

Семинар в НИВЦ МГУ. Москва, 14 марта 2013 г.

Прогнозирование погоды и состояния морской среды – взаимозависимость и взаимовлияние

Ю.Д. Реснянский, А.А. Зеленько



ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский
центр Российской Федерации»



План изложения

В докладе рассматриваются современные подходы к прогнозированию погоды и состояния морской среды, технологические компоненты прогностических систем, а также возможности прогнозов разной заблаговременности, определяемые объективными ограничениями на предсказуемость процессов разных масштабов

- 1. Методологическая основа**
- 2. Объективные ограничения предсказуемости**
- 3. Способы преодоления ограничений**
- 4. Возможности прогнозов на длительные сроки**
- 5. Прогнозирование состояния морской среды – взаимосвязь с атмосферой**
- 6. Пути дальнейшего развития прогностических систем**



Методологическая основа прогнозирования

Современные подходы к прогнозированию погоды и состояния морской среды исходят из понимания того, что изменения погоды в атмосфере и океане определяются динамическими и физическими процессами, протекающими в атмосфере, океане и деятельном слое суши

Эти процессы, в свою очередь, могут быть описаны уравнениями термогидродинамики воздушной среды и примыкающих к ней жидкой и твердой оболочек

Прогнозирование их развития во времени осуществлено путем численного решения соответствующей системы уравнений как задачи с начальными условиями

Численные модели – основной инструмент прогнозирования

Объект прогнозирования – меняющееся состояние атмосферы и океана

Атмосфера и океан – тесно взаимосвязанные звенья единой климатической системы



Прогнозирование невозможно без учета этой взаимосвязи



Что требуется для прогнозирования погоды и состояния морской среды

1. Технологический комплекс, обеспечивающий функционирование всех компонентов прогностической системы
2. Подсистема приема и первичной обработки данных гидрометеорологических наблюдений с разнообразных платформ
3. Подсистема оценки текущего состояния атмосферы и океана для определения начальных условий на основе имеющихся данных наблюдений
4. Прогностическая модель
5. Подсистема распространения (доведения продукции до потребителей)



Как определяются начальные условия

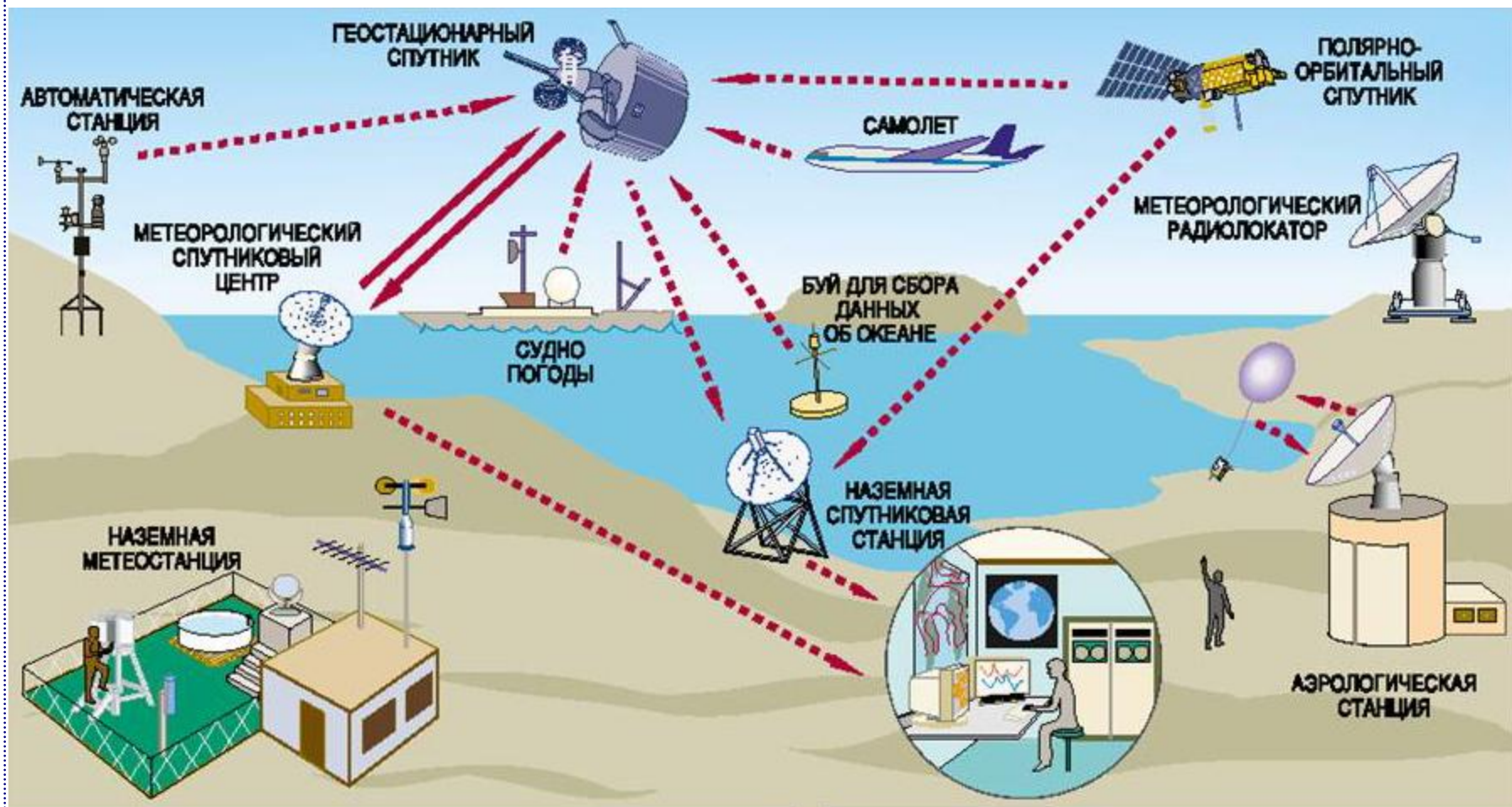
Начальные условия задаются на основе оценки текущего состояния атмосферы и океана по всей их толще для всех характеристик среды (температура воздуха, влагосодержание, атмосферное давление, компоненты скорости ветра, температура и соленость воды, скорость течений и др.)

Источник информации – данные наблюдений, получаемые с разнообразных измерительных платформ



Данные наблюдений

Основные компоненты наблюдательной системы





Чем осложняется определение начальных условий по данным наблюдений

- ✓ **Необходимость глобального анализа**
- ✓ **Неполнота имеющихся наблюдений**
- ✓ **Разнородность данных наблюдений**
- ✓ **Неточность данных наблюдений**



Как преодолеваются осложнения

Система усвоения данных

Система усвоения данных – это технологическая реализация методологии получения наилучшей оценки истинного состояния гидрометеорологических полей по данным всех доступных наблюдений с использованием прогностической модели

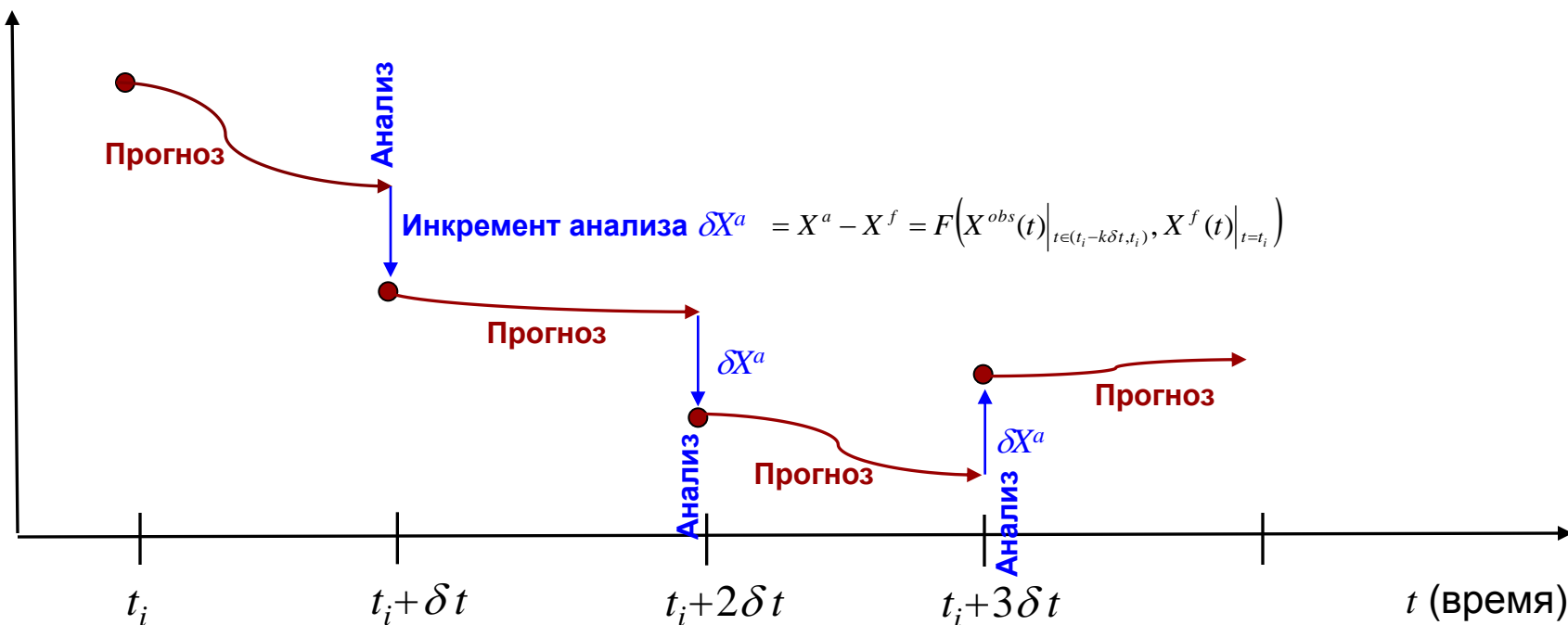
Суть процедур усвоения данных

Комбинирование (синтез) данных наблюдений и результатов расчетов по соответствующей эволюционной модели с учетом статистической структуры ошибок каждого из них



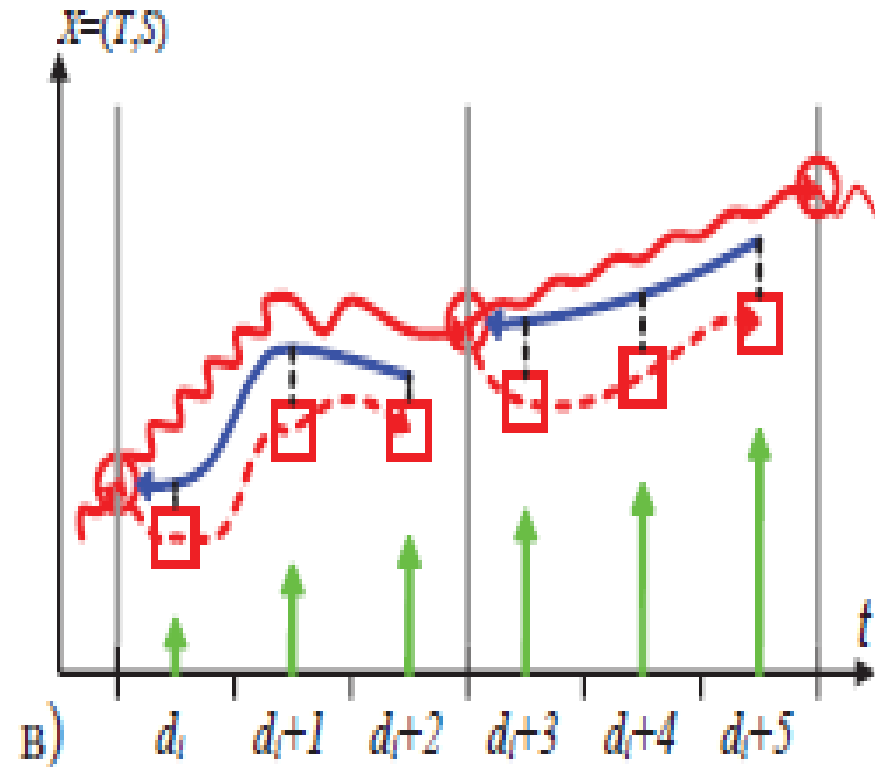
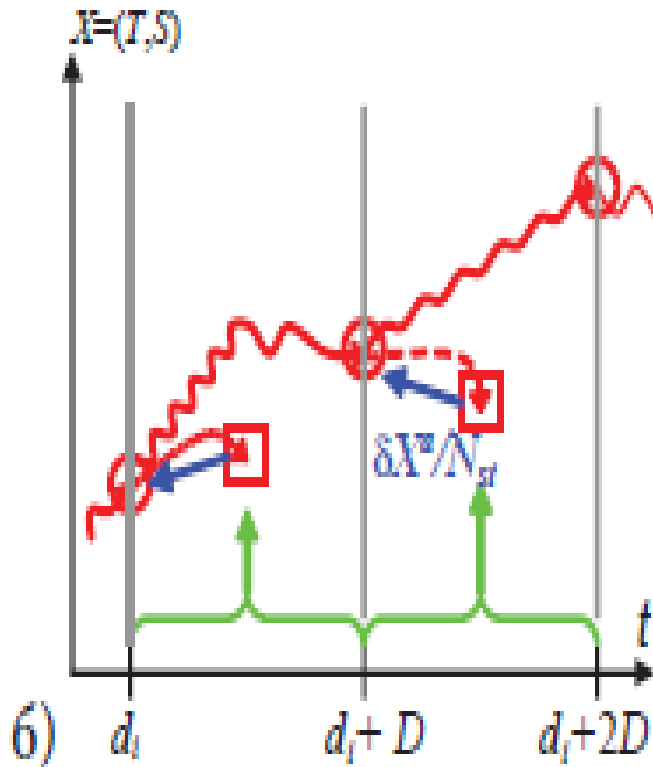
Простейшая схема последовательного усвоения данных

Переменная состояния X



Усвоение данных производится циклически, по схеме «анализ-прогноз». На шаге анализа в каждом цикле усваиваются все наблюдения в скользящем временном окне

Схемы последовательного усвоения данных с дробными инкрементами анализа





Процедуры анализа

- **Оптимальная интерполяция**
- **Двумерный/трехмерный вариационный анализ**

Искомое поле анализа X – минимум функционала

$$J[X] = \frac{1}{2}(X - X^f)^T B^{-1}(X - X^f) + \frac{1}{2}(X^{obs} - HX)^T R^{-1}(X^{obs} - HX)$$

- **Ансамблевый фильтр Калмана**
- **Четырехмерный вариационный анализ**



Прогностические модели: теоретическая основа

Основа прогностических моделей – численное решение системы уравнений термогидродинамики атмосферы и океана, выражающих физические законы:

- Сохранения количества движения (уравнения движения)
- Сохранения энергии
- Сохранения массы воздуха/воды (уравнение неразрывности)
- Сохранения активных примесей (атмосферной влаги, морских солей)
- Уравнение состояния
- Соотношения для приближенного описания «подсеточных процессов»



Пример математической формулировки – Модель общей циркуляции океана ГМЦ

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L_a u - \frac{uv \operatorname{tg} \varphi}{a} - f v = -\frac{1}{\rho_r a \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial u}{\partial z} + A_M \left[\nabla^2 u + \frac{(1 - \operatorname{tg}^2 \varphi) u}{a^2} - \frac{2 \sin \varphi}{a^2 \cos^2 \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + L_a v + \frac{u^2 \operatorname{tg} \varphi}{a} + f u = -\frac{1}{\rho_r a} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial v}{\partial z} + A_M \left[\nabla^2 v + \frac{(1 - \operatorname{tg}^2 \varphi) v}{a^2} + \frac{2 \sin \varphi}{a^2 \cos^2 \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right]$$

$$\partial p / \partial z = g \rho$$

$$\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} (v \cos \varphi) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + L_a T = \frac{\partial}{\partial z} \kappa \frac{\partial T}{\partial z} + A_H \nabla^2 T - \lambda_T (T - T_g)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + L_a S = \frac{\partial}{\partial z} \kappa \frac{\partial S}{\partial z} + A_H \nabla^2 S - \lambda_S (S - S_g)$$

$$\rho = \rho(T, S, p)$$

Определение операторов:

$$L_a \alpha = \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (u \alpha) + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} (v \alpha \cos \varphi) + \frac{\partial}{\partial z} (w \alpha)$$

$$\nabla^2 \alpha = \frac{1}{a^2 \cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \varphi} \cos \varphi \right)$$



Прогностические модели: конечномерная аппроксимация

Прогностические модели, с помощью которых составляется прогноз, представляют прогнозируемую среду на трехмерной сетке

Горизонтальные шаги современных
прогностических моделей атмосферы

Глобальных

Порядка несколько десятков км

ЕЦСПП ~16 км

НСЕР ~20 км

ГМЦ ~100 км

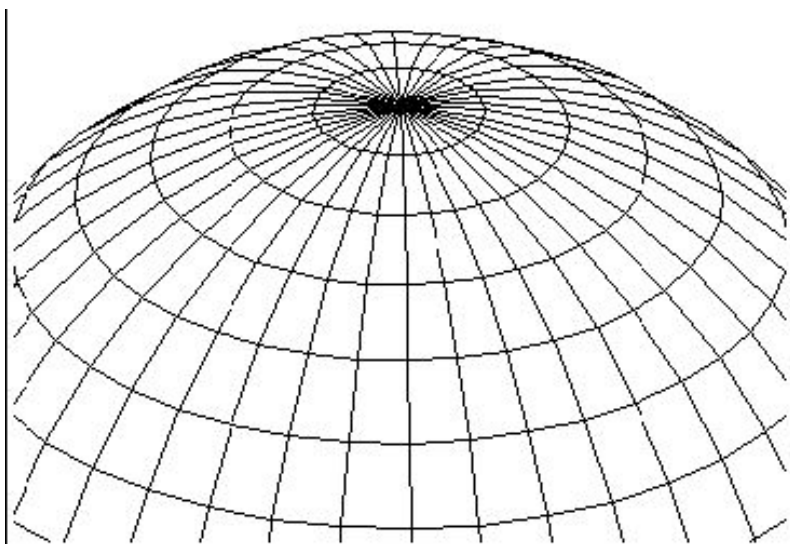
Мезомасштабных

Порядка нескольких км

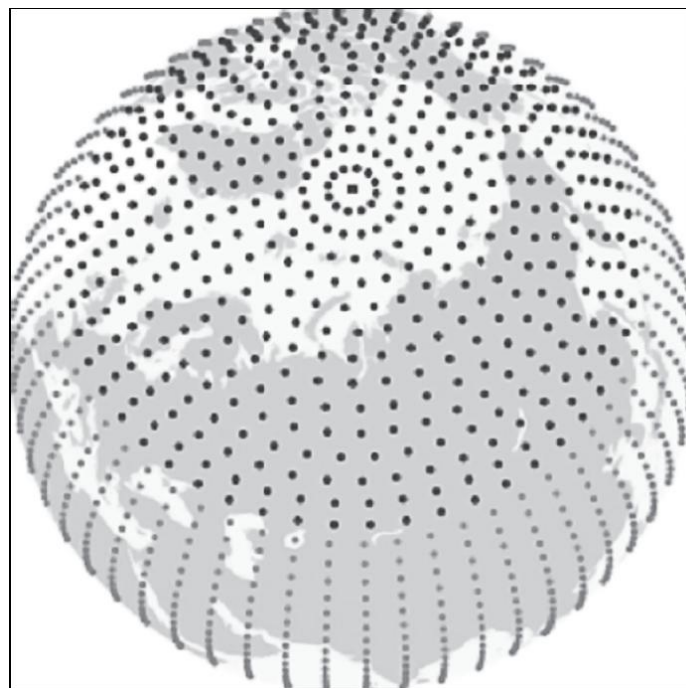
ГМЦ ~ 2 – 7 км

Расчетные сетки

Широтно-долготная

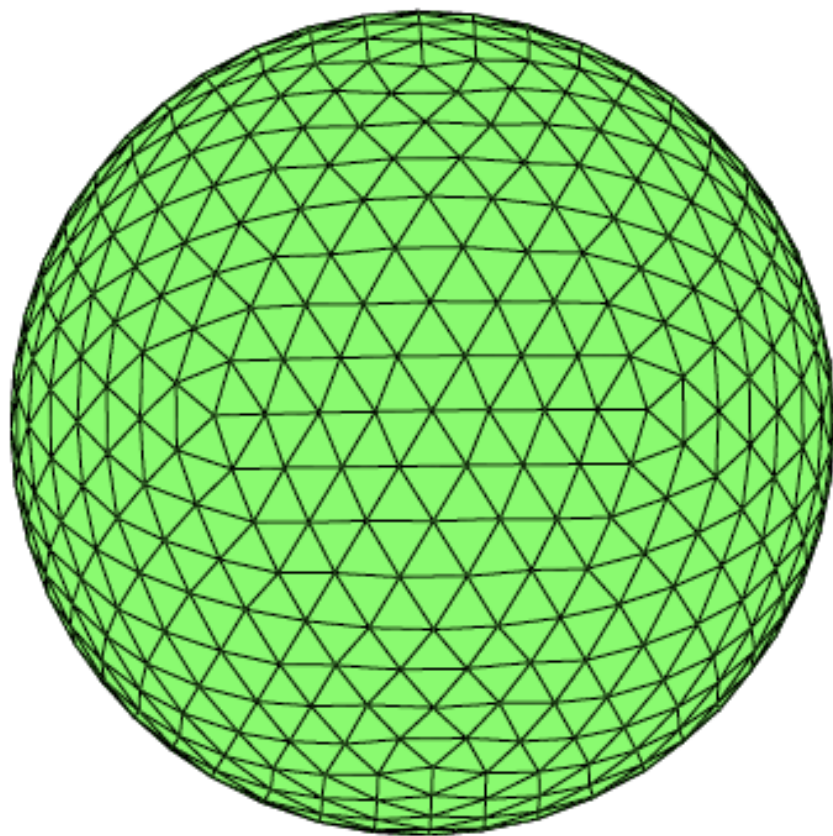


**Широтно-долготная
редуцированная**

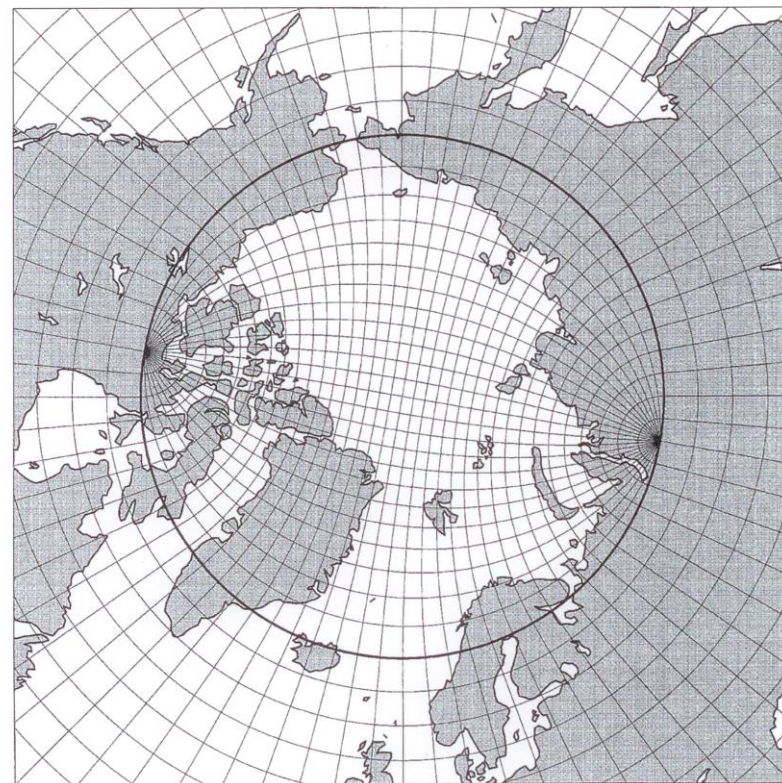


Расчетные сетки

Икосаэдральная



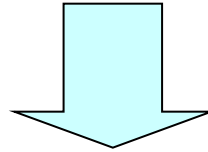
Трехполюсная





Численный метеорологический прогноз

Зависимость от океана



Численный метеорологический прогноз невозможен без информации о состоянии поверхностных вод океана, необходимой для постановки граничных условий на нижней границе атмосферы



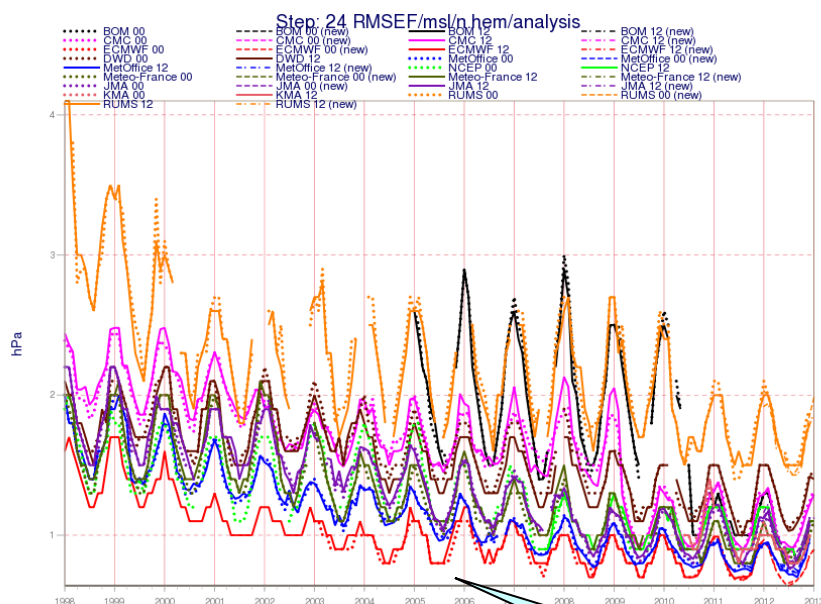
Среднесрочный прогноз (до 10 суток)

Необходимые для интегрирования прогностической модели температура поверхности океана и распределение морских льдов определяются по данным анализа на момент старта интегрирования

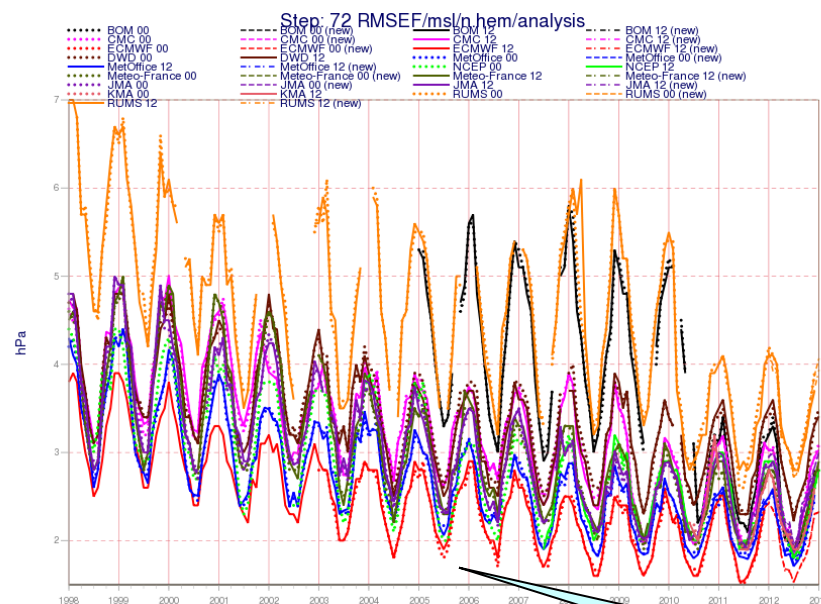


Качество прогнозирования на несколько суток – стабильное повышение на протяжении последних десятилетий

Точность численных прогнозов на трое суток сегодня такая же как 10 лет назад на одни сутки



На 24 часа



На 72 часа

Среднеквадратичная ошибка прогнозов SLP, гПа

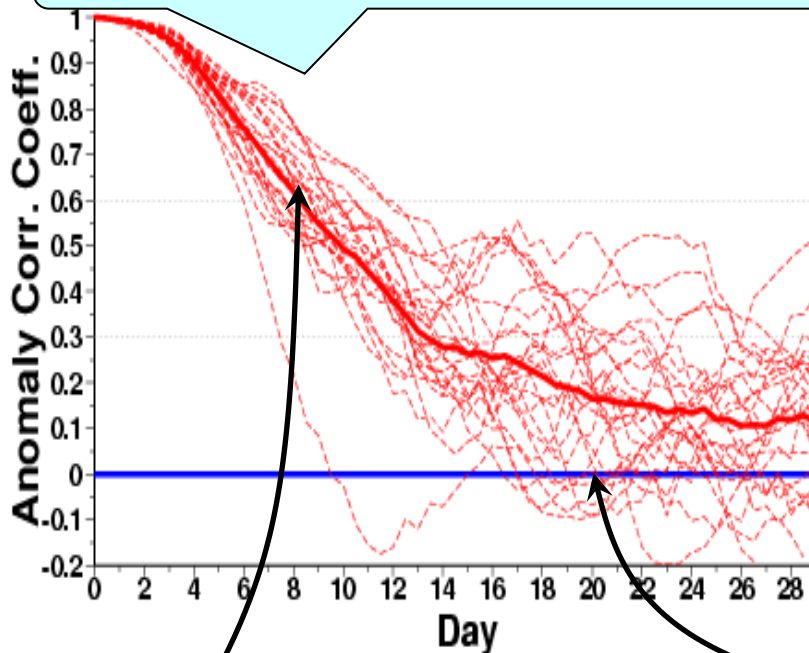
Источник: http://apps.ecmwf.int/wmolcdnv/scores/time_series/msl
WMO Lead Centre for Deterministic Forecast Verification (WMO-LCDNV)



Нарастание ошибок с увеличением заблаговременности прогноза

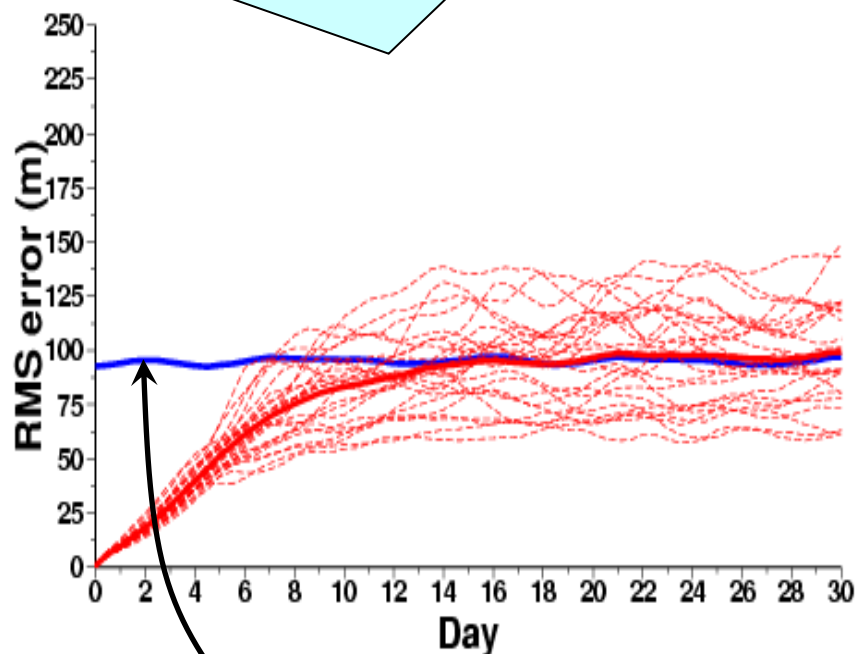
(H500, Северное полушарие)

Коэффициент корреляции



Средняя по всем случаям
успешность прогноза

Среднеквадратическая ошибка



Ошибка климатического
прогноза



Объективные ограничения

Предсказуемость 1 рода

Точность прогнозирования лимитируется неустойчивостью динамических процессов, проявляющейся в разбегании фазовых траекторий, исходящих из окрестности неточно заданного начального состояния



Ограничения предсказуемости

**Строгое объяснение механизма
возникновения ограничений предсказуемости
в динамической системе**

Lorenz E.N., 1963: Deterministic Nonperiodic Flow.
J. Atmos. Sci., **20**, 130–141.



Аттрактор Лоренца:

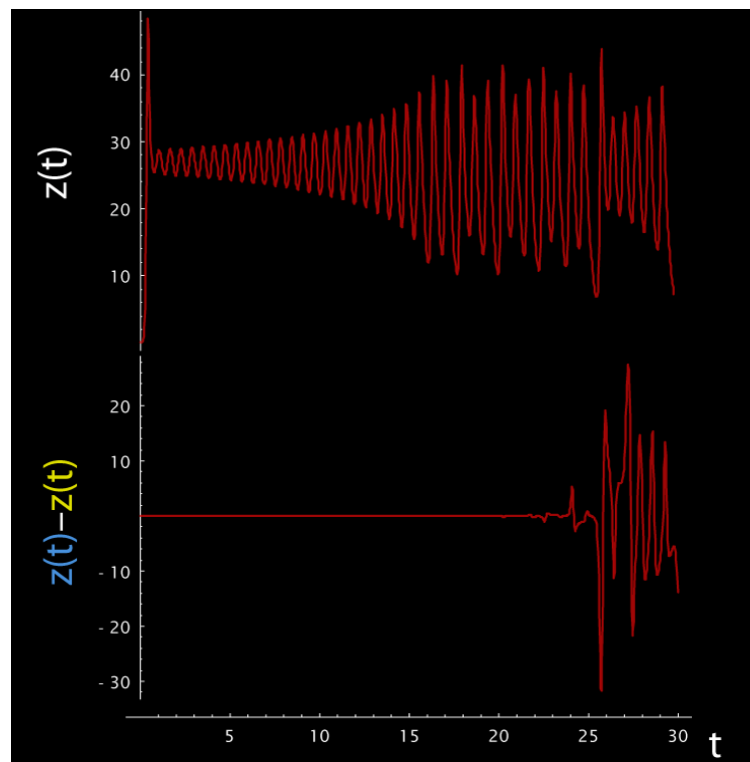
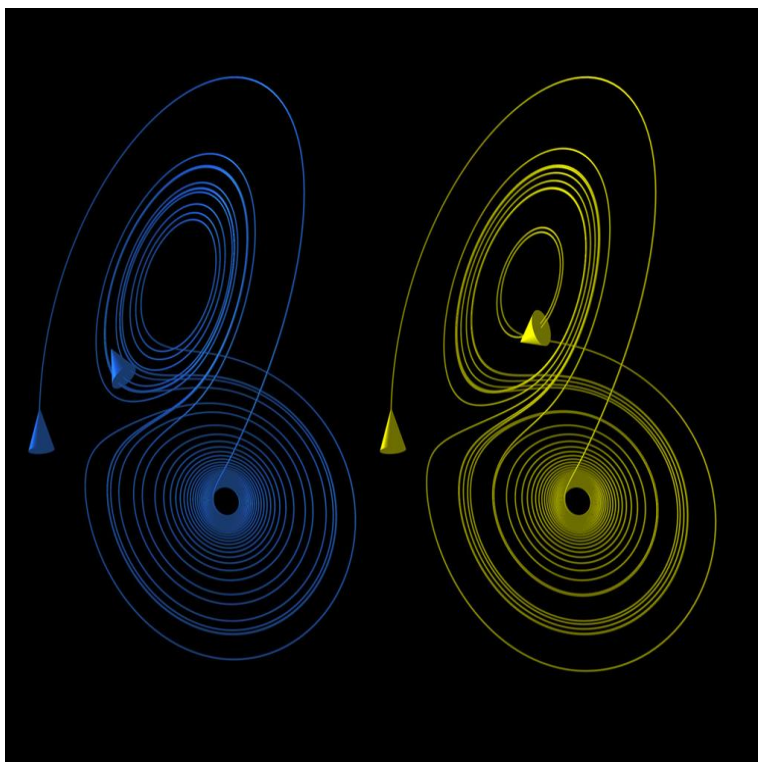
$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x) \\ \dot{y} = x(r - z) - y \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases}$$



Американский
математик и
метеоролог
Эдвард Лоренц
(Edward Lorenz)
(1917-2008)



Возникновение неопределенностей в трехкомпонентной динамической системе (сильно упрощенной модели атмосферы)



Аттрактор Лоренца («Эффект бабочки»; *E.N. Lorenz, 1963*) для двух ничтожно мало (всего на 10^{-5}) различающихся начальных значений x -координаты



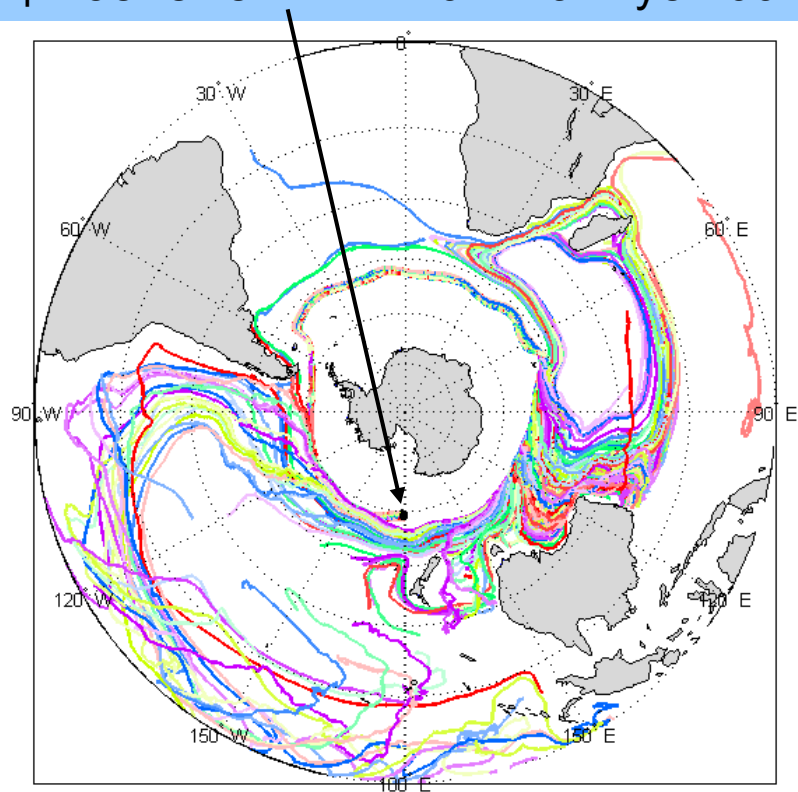
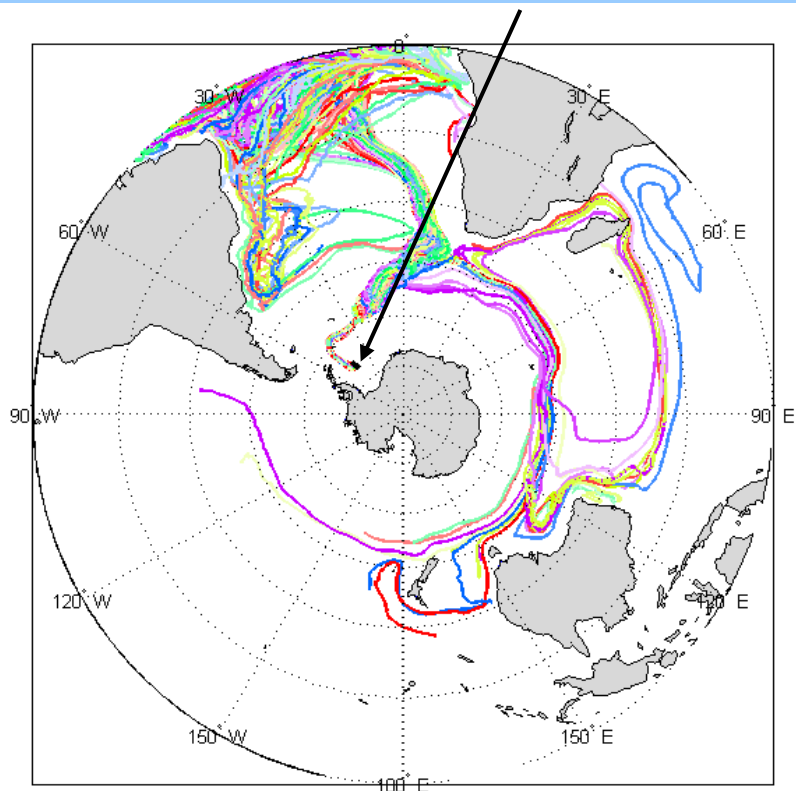
Предсказуемость первого рода

Ограничение предсказуемости первого рода определяется чувствительной зависимостью *от начальных условий* и составляет для атмосферы 2-3 недели, для океана ~около 2 месяцев

Ограничение имеет объективный характер
Не зависит от мастерства прогнозистов

Разбегание траекторий в реальной океанской модели – по горизонтали

Начальное положение 100 жидких частиц в объеме $2^\circ \times 2^\circ \times 20$ м на глуб. 100 м

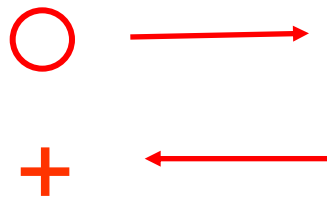


Горизонтальные проекции ансамбля траекторий жидких частиц, переносимых меняющимися со временем крупномасштабными течениями в течение 24 лет 01.01.1979–31.12.2002 по данным численного эксперимента

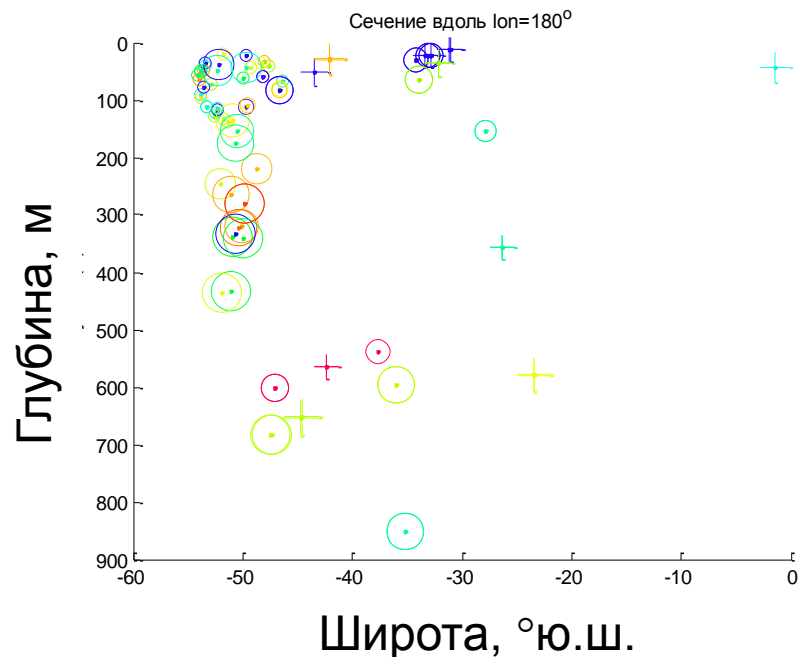
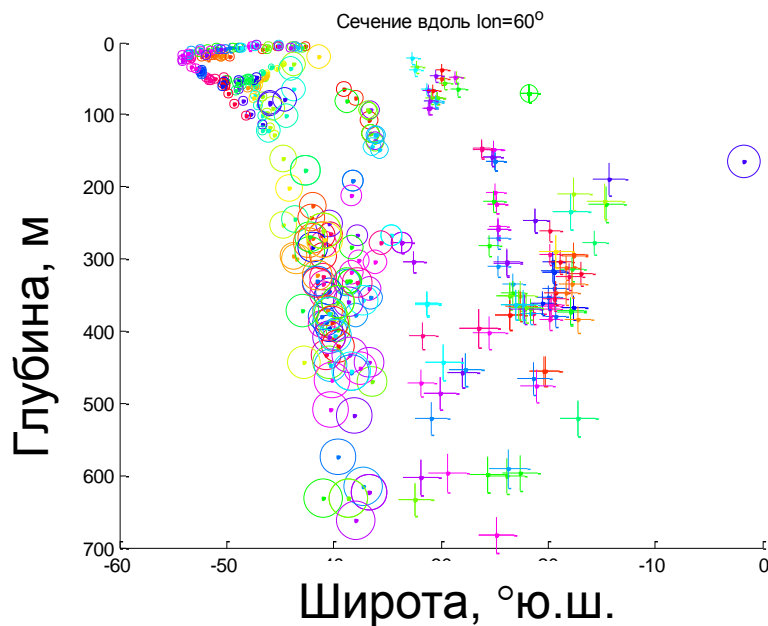


Разбегание траекторий в реальной океанской модели – по вертикали

Меридиан $\lambda=60^\circ$ в.д.



Меридиан $\lambda=180^\circ$



Пересечения двух меридиональных плоскостей ансамблем из 100 жидких частиц, стартовавших на глубине 100 м в проливе Дрейка и переносимых крупномасштабными течениями в течение 24 лет 01.01.1979–31.12.2002



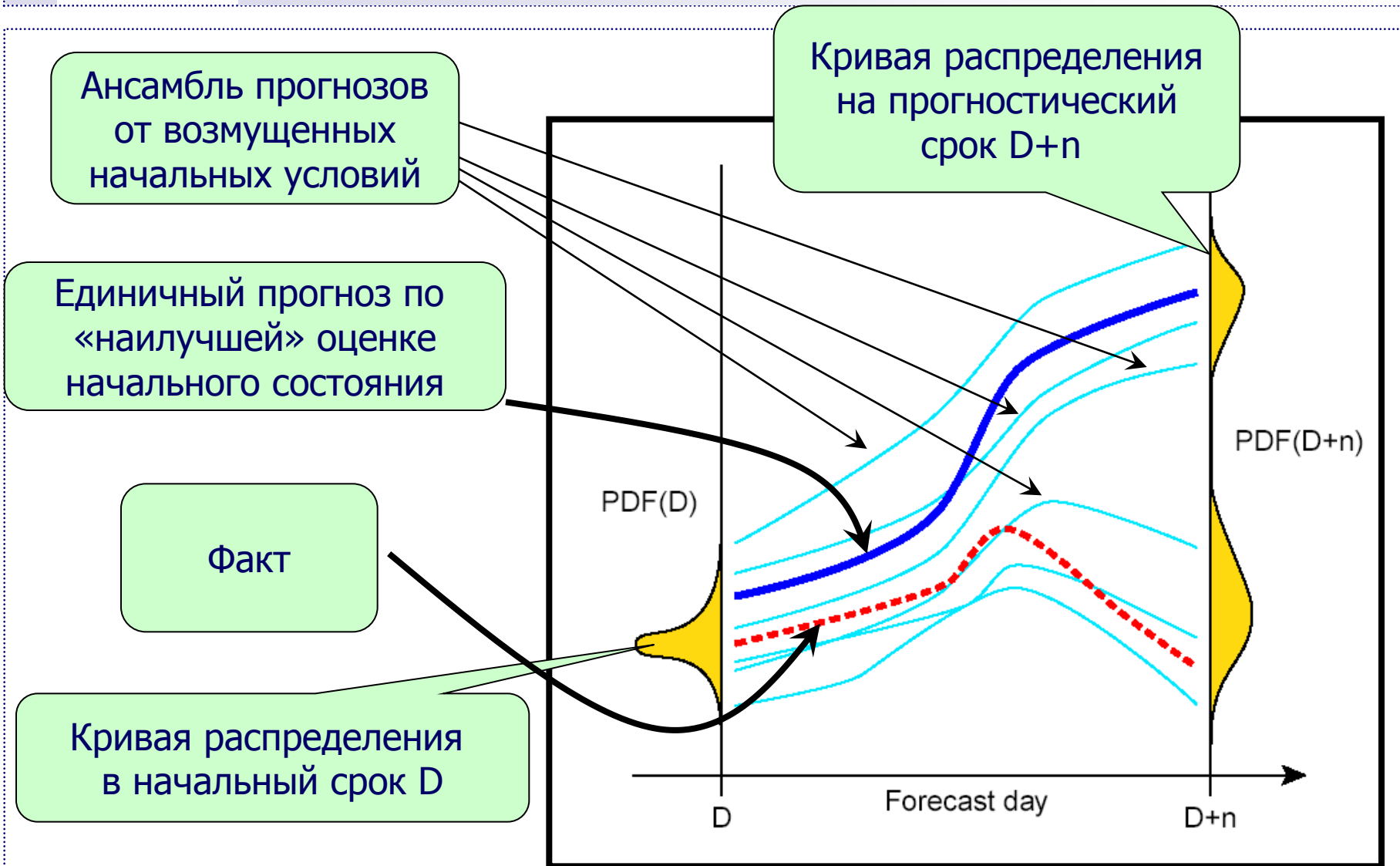
Как действовать в условиях ограничений, имеющих объективный характер

Вероятностная формулировка прогнозов

Ансамбли как инструмент вероятностной
формулировки прогнозов
(метод Монте-Карло)



Ансамбли – принципиальная схема

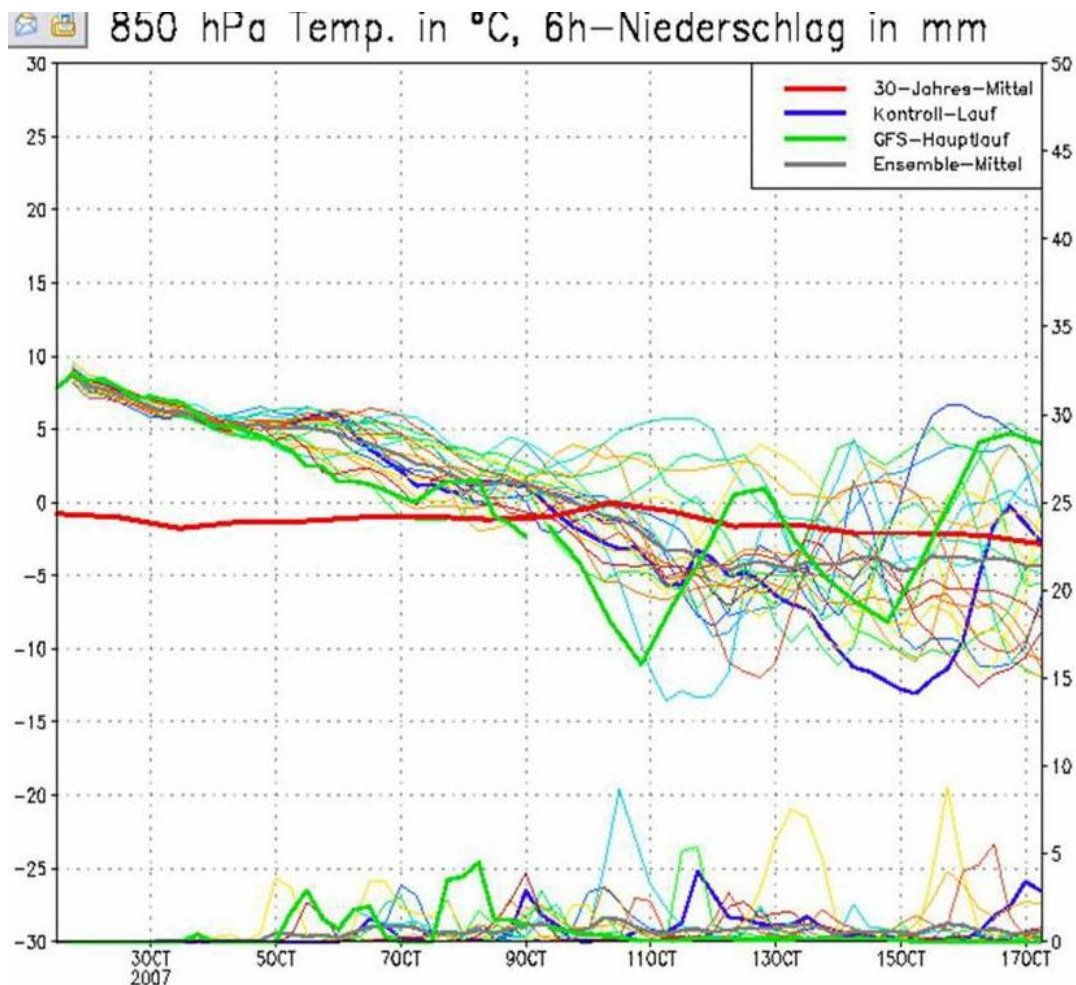




Ансамбли – представление в виде веерных диаграмм (EPS plumes)

Помогают оценить:

- Надежность прогноза (малый разброс – большая надежность)
- Минимальные и максимальные величины
- Наличие альтернативных решений (кластеров)





Ансамбли – представление в виде карт «спагетти»



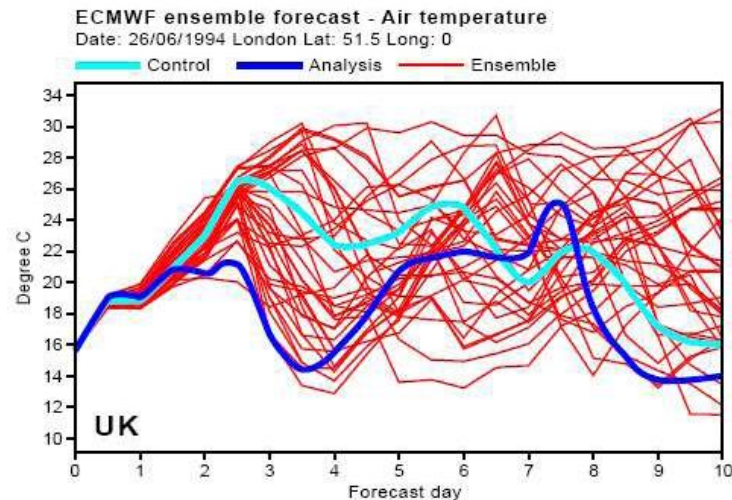
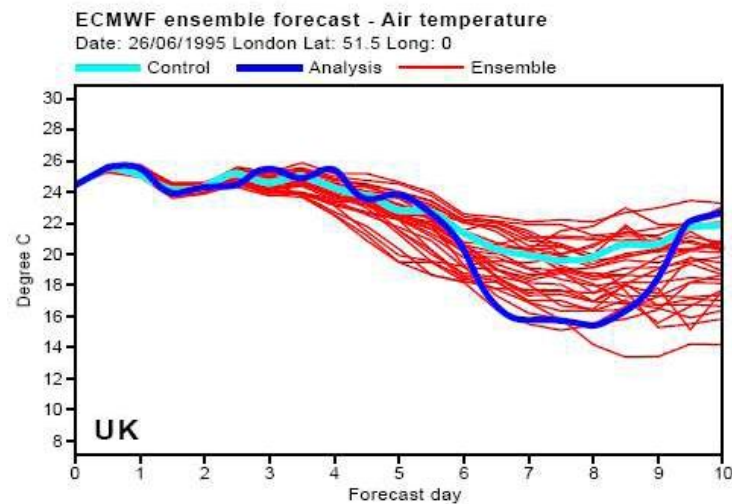


Ансамбли – пример ситуаций с разной предсказуемостью

Пример ситуаций с
разной
Предсказуемостью

Прогноз ЕЦССТП
температуры
воздуха в Лондоне
26 июня 1995 г и
26 июня 1994 г

Красный - ансамбль
прогнозов
Голубой - контрольный
прогноз
Синий - анализ





Предсказуемость второго рода

Существование ограничений по динамической предсказуемости не означает, что для составления прогнозов на сроки свыше двух–трех недель вообще нет никаких объективных оснований

Возможность составления информативных суждений о состоянии атмосферы на месячных, сезонных и более длительных интервалах времени определяется существованием предсказуемости 2-го рода

Она связана с тем, что статистика меняющихся день ото дня погодных условий зависит не столько от начального состояния самой атмосферы, сколько от состояния океана и поверхности суши, являющихся более инерционными и потому легче прогнозируемыми средами

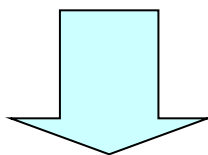


Объект долгосрочного прогнозирования

Обобщенные статистические характеристики
(средние, повторяемости, вероятности)

Долгосрочный метеорологический прогноз (ДМП)

Зависимость от океана



**Влияющие на эволюцию атмосферы ТПО рассчитываются
либо по совместным моделям либо по упрощенным
методикам, учитывающим инерционность ТПО**



Предположения, лежащие в основе ДМП

- ✓ Источник информативного сигнала – влияние медленно меняющихся внешних воздействий (главным образом состояния подстилающей поверхности – океана на 71 % площади Земли)
- ✓ Хаотичность динамики атмосферы → недетерминированность реакции атмосферы на внешние воздействия → возможность обоснованной оценки лишь вероятностей распределения прогнозируемых состояний
- ✓ Способность ансамблей давать информацию о функции распределения состояний атмосферы – наиболее вероятном состоянии и степени неопределенности



Мультимодельные ансамбли

Практическим вариантом учета неопределенности в формулировках моделей атмосферы является построение мультимодельных ансамблей прогностических реализаций:

- ✓ Концерн EUROSIP (European Seasonal to Interannual Prediction) комбинирует прогнозы, выпускаемые на основе совместных моделей атмосферы и океана трех центров, — ЕЦСПП, МетОфиса Великобритании и МетеоФранс.
- ✓ APCC (Asia Pacific Climate Centre) – Климатический центр стран Азиатско-Тихоокеанского региона – 17 участников из разных стран (в том числе ГМЦ и ГГО)
- ✓ Международный институт климата и общества (IRI — International Research Institute for Climate and Society, США)
- ✓ Канадский метеорологический центр (20 членов ансамбля по двум совместным моделям)
- ✓ Северо-Евразийский климатический центр (Москва, модели ГМЦ и ГГО)



Сезонные прогнозы

Международная координация под эгидой ВМО

12 центров-производителей глобальных долгосрочных прогнозов



Latest PMME plot

[View all](#)

Notice / News

[More](#)

Check! System Requirements

All GPCs(12) for FMA 2013 are uploaded new

2013.01.23

Forecasts for FMA 2013 are uploaded new

2013.01.17

All GPCs(12) for JFM 2013 are uploaded

2012.12.17

Forecasts for JFM 2013 are uploaded

2012.12.14

All GPCs(12) for DJF 2012 are uploaded

2012.11.20

Latest Individual Forecast plot

[View all](#)

WMO Global Producing Centres



Координация: WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble (LC-LRFMME) – KMA and NOAA/NCEP

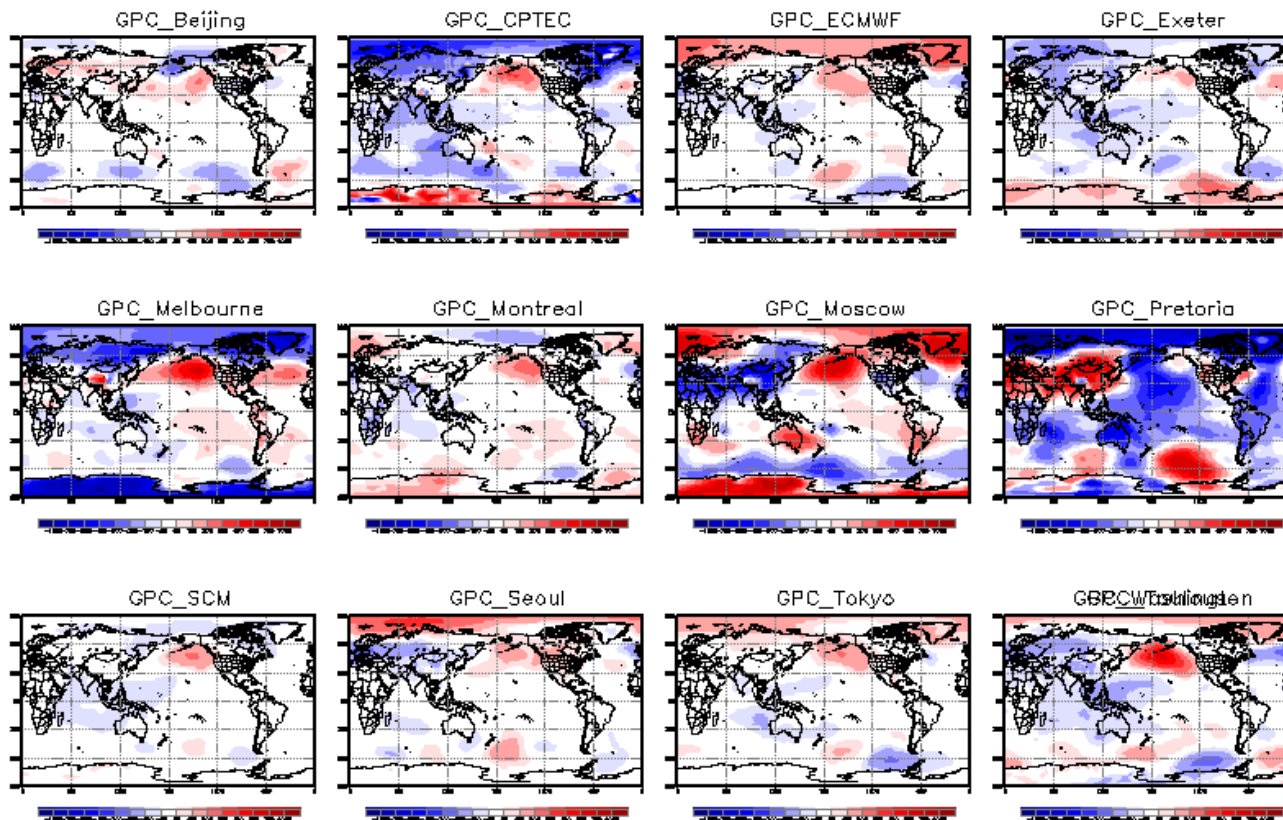


Сезонные прогнозы давления на уровне моря различных центров на февраль-март-апрель 2013 г.

lat=-90 90
lon=0 360

Mean Sea Level Pressure : FMA2013

(issued on Jan2013) [Unit: Pa]



по данным WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble



Согласованность различных сезонных прогнозов

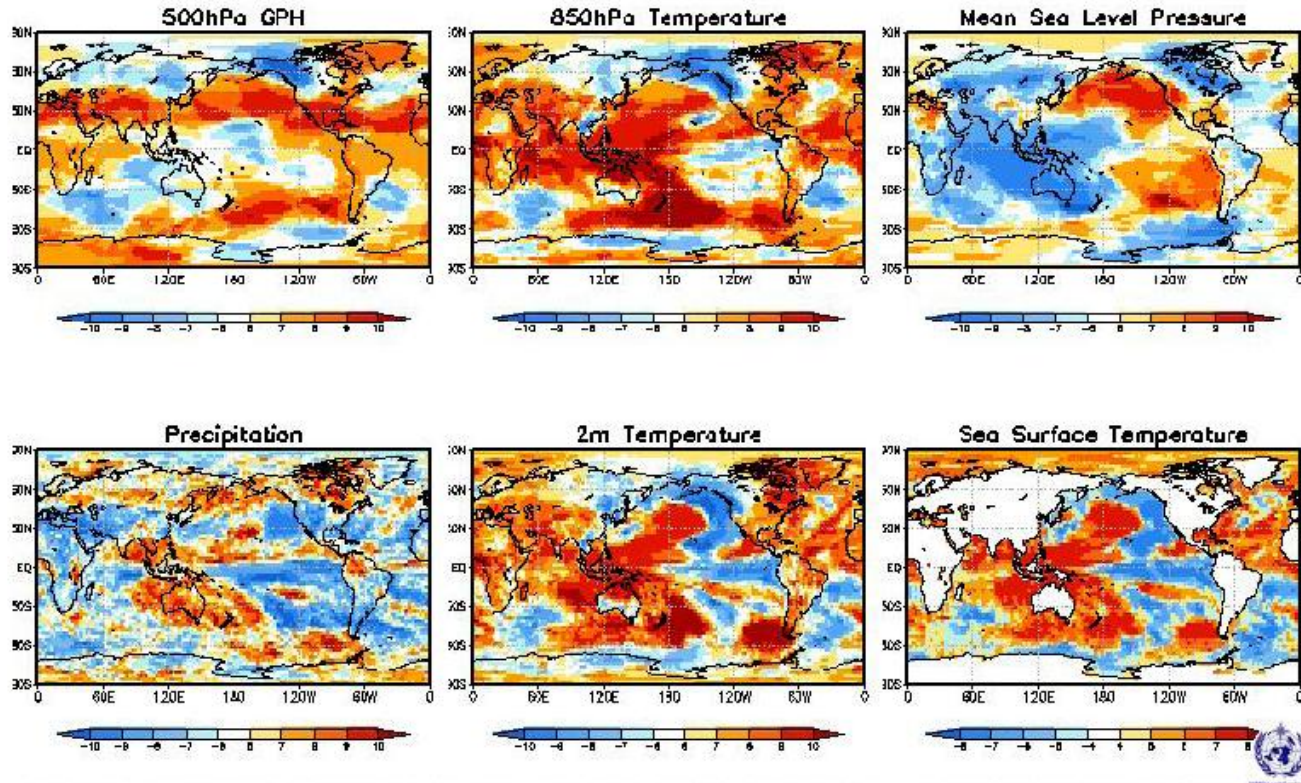
по данным WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble

Consistency Map

GPC_seoul/melbourne/ecmwf/exeter/montreal/toulouse/pretoria/moscow/cptec/beijing

SST : GPC_seoul/washington/melbourne/montreal/tokyo/ecmwf/exeter/toulouse/beijing

Feb2013 + MAM forecast



** where, the positive numbers mean the number of models that predict positive anomaly and vice versa. **



Северо-Евразийский климатический центр

Создан на основе решения 18-й Сессии Межгосударственного совета по гидрометеорологии стран СНГ в апреле 2007 г.





Сезонные прогнозы – СЕАКЦ

Прогностические модели

SI-AV - глобальная полулагранжева модель среднесрочного прогноза погоды, разработанная в ИВМ РАН совместно с ГУ Гидрометцентр России. Имеет пространственное разрешение 1.125° широты и 1.40625° долготы и 28 вертикальных уровней (Киктев и др., 2006). Модель генерирует **20 членов ансамбля** по начальным данным реанализа-2 NCEP/NCAR с использованием техники брединга выращивания быстро растущих мод). Граничными условиями служат начальные аномалии ТПО в течение всего прогностического периода.

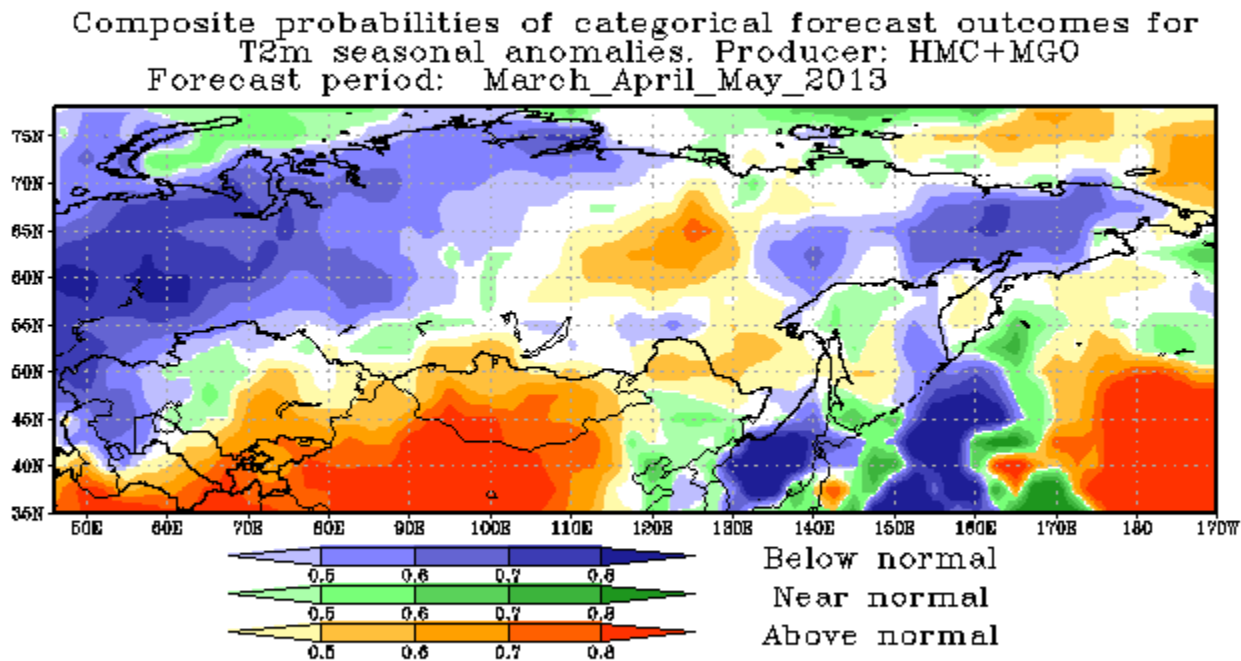
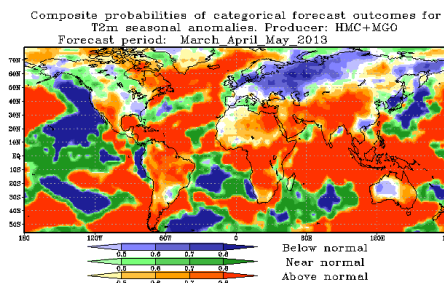
MGO – модель Главной геофизической обсерватории (Россия) T42L14 генерирует **10 членов ансамбля**. Ансамбль формируется посредством генерации и внесения возмущений в начальные поля (поля объективного анализа Гидрометцентра России). Процедура выращивания возмущений, основанная на анализе сингулярного спектра линеаризованного оператора модели, обеспечивает максимальный разброс решений при заданной норме вносимых ошибок. В качестве температуры поверхности океана используются инерционные прогнозы.

На сайте СЕАКЦ для авторизованных НГМС европейского и азиатского регионов сегодня представлены долгосрочные прогнозы Гидрометцентра России и ГГО, а также их совместные вероятностные сезонные прогнозы

В настоящее время проводятся эксперименты на базе **совместной модели атмосферы и океана Гидрометцентра России и ИВМ РАН** для сезонного прогноза.

Сезонные прогнозы – СЕАКЦ

Прогноз аномалий T2m на сезон март-апрель-май 2013 г. с нулевой заблаговременностью



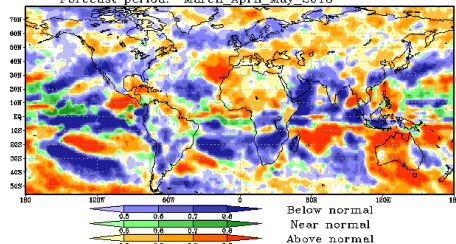
Источник: <http://seакс.meteoinfo.ru>



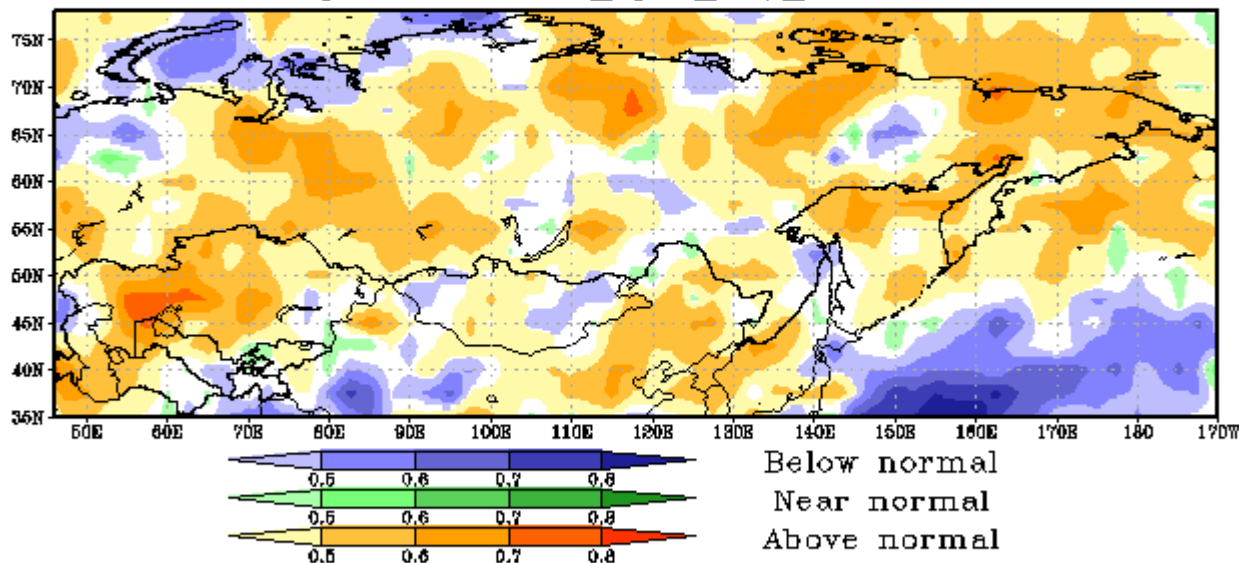
Сезонные прогнозы – СЕАКЦ

Прогноз аномалий осадков на сезон март-апрель-май 2013 г. с нулевой заблаговременностью

Composite probabilities of categorical forecast outcomes for
Precipitation seasonal anomalies. Producer: HMC+MGO
Forecast period: March_April_May_2013



Composite probabilities of categorical forecast outcomes for
Precipitation seasonal anomalies. Producer: HMC+MGO
Forecast period: March_April_May_2013



Источник: <http://seakc.meteoinfo.ru>



Сезонные прогнозы – СЕАКЦ

Обзор ожидаемых условий, составляемых на основе экспертного анализа результатов численных прогнозов

Температурный режим (приземная температура воздуха)

По результатам расчетов моделей Гидрометцентра России и ГГО, предстоящий 3-месячный период (март—май 2013) ожидается

теплее обычного

в Турции, в Израиле, на юго-востоке Казахстана, в Кыргызстане, Таджикистане, Туркменистане и Узбекистане, на большей части территории Якутии (кроме северо-востока), на юге Дальнего Востока, в Монголии.

холоднее обычного

в странах Восточной Европы, на европейской территории России, на Урале в Сибири, на северо-востоке Якутии и на Чукотке.

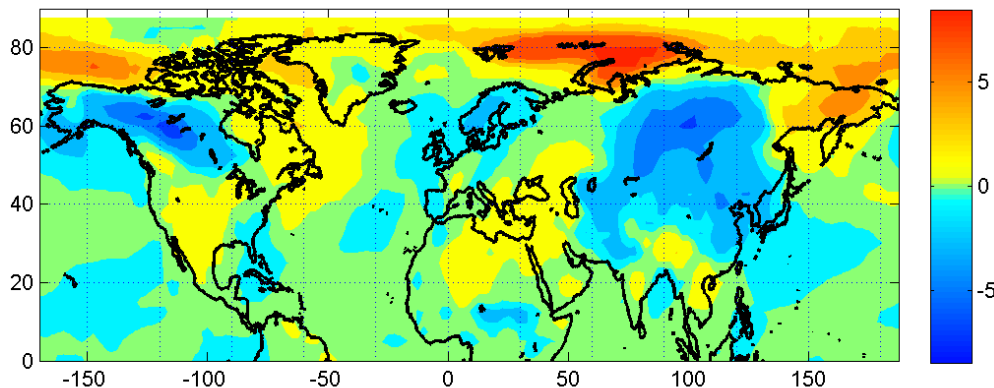
На территории других регионов Северной Евразии сезон предполагается близким к климатической норме.



Степень успешности – конкретные прогнозы

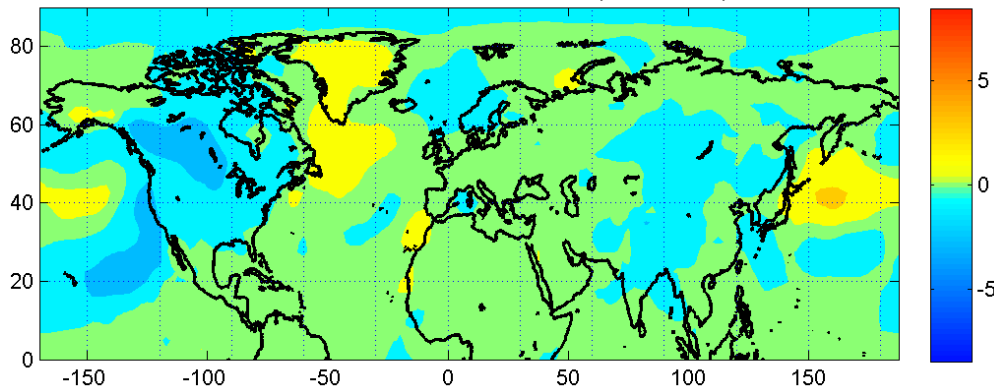
ANOMALIES t_{2m} (deg). OND 2012. Season

OBSERVED ANOMALIES



Наблюдаемые аномалии T_{2m}
в октябре-декабре 2012 г.

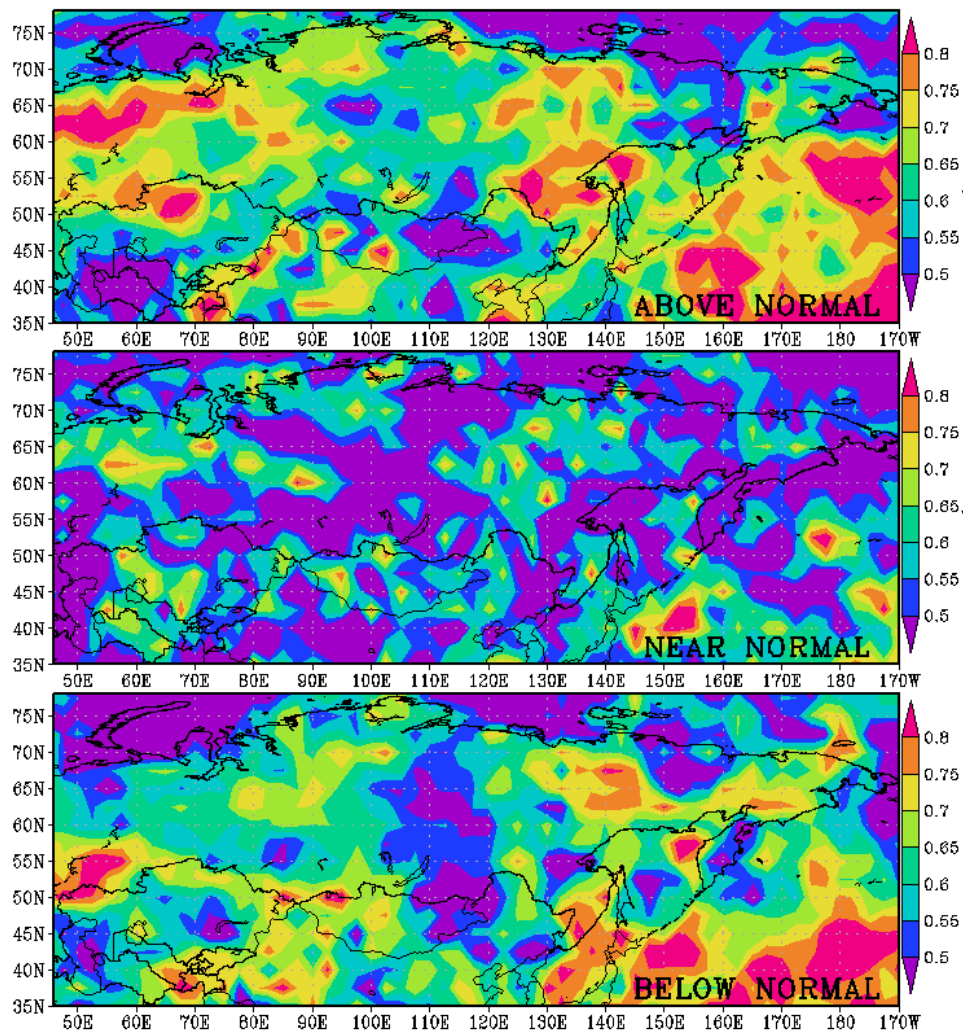
FORECAST ANOMALIES (HMC+MGO)



Прогностические аномалии
 T_{2m} в октябре-декабре 2012 г.



Оценки успешности – ретроспективные



Показатель ROC для
ретроспективных прогнозов T2m
по модели ПЛАВ за 1979-2003 г.
на зимний сезон

Для категории «выше нормы»

Для категории «норма»

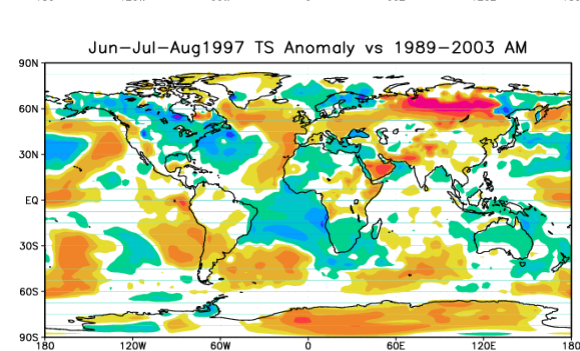
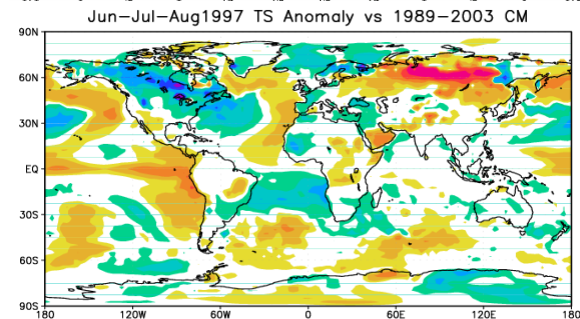
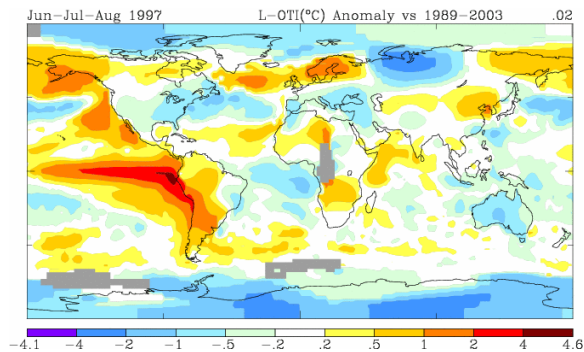
Для категории «ниже нормы»

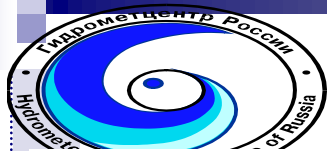
Преимущества совместной модели

Наблюдаемая аномалия T2m
летом 2007 г.

Сезонный прогноз
по совместной модели

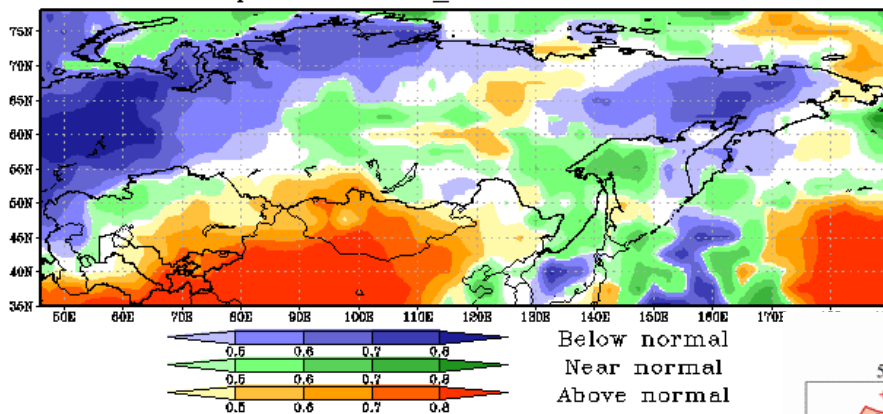
Сезонный прогноз
по модели атмосферы
с упрощенным способом учета ТПО





Месячные прогнозы ГМЦ

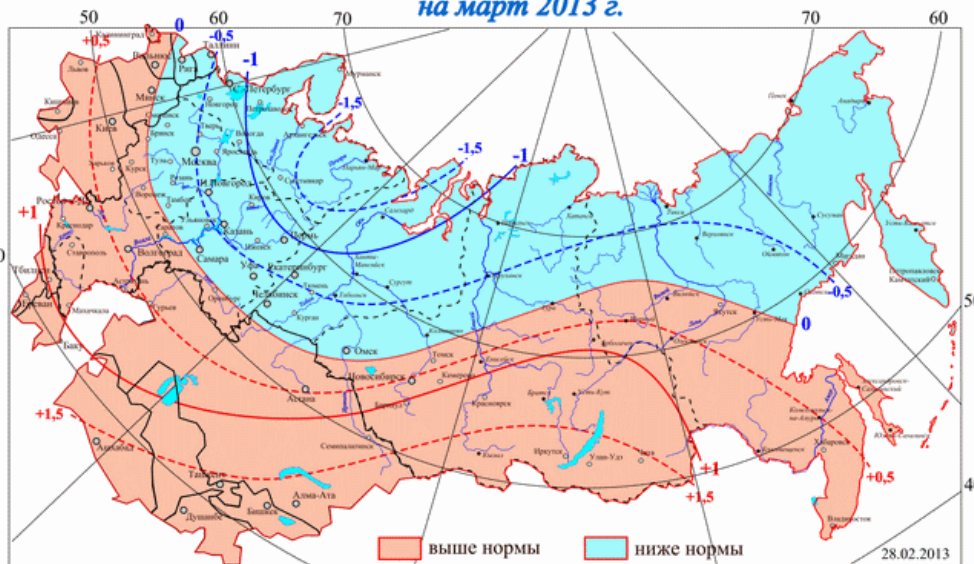
Composite probabilities of categorical forecast outcomes for T2m seasonal anomalies. Producer: HMC+MGO
Forecast period: March_2013



Численный прогноз T2m на март 2013 в рамках технологии СЕАКЦ

Официальный прогноз ГМЦ T2m на март 2013. Результат применения статистических процедур и экспертных оценок

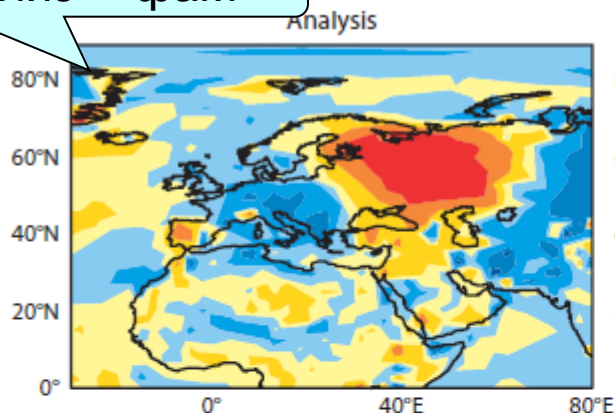
Прогноз аномалии средней месячной температуры воздуха на март 2013 г.



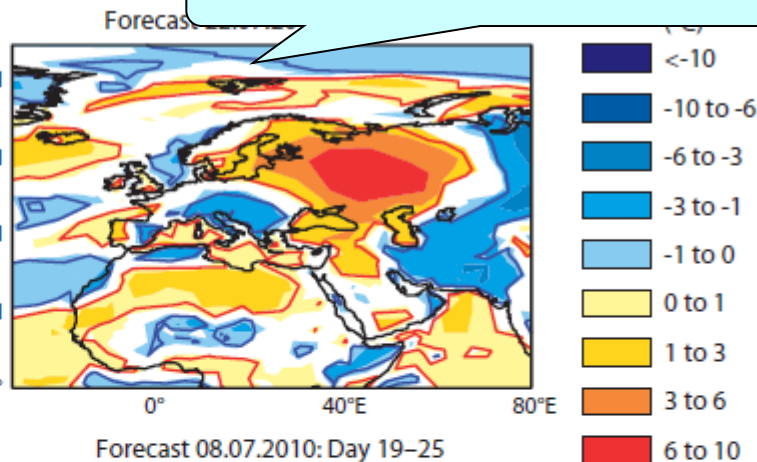


Реальные возможности численного прогноза. Аномально жаркая погода летом 2010 г. – месячный прогноз ЕЦСПП

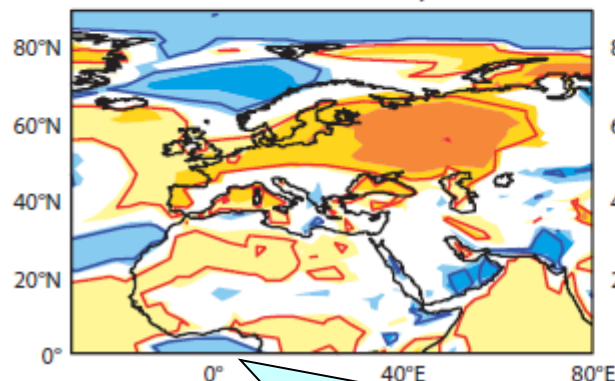
Анализ -- факт



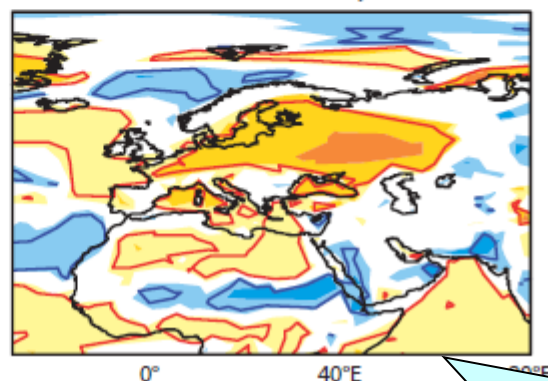
Прогноз от 22.07, 5-11 сутки



Forecast 15.07.2010: Day 12-18



Forecast 08.07.2010: Day 19-25



Прогноз от 15.07, 12-18 сутки

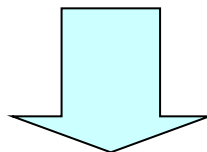
Прогноз от 08.07, 19-25 сутки

Средняя аномалия приземной температуры воздуха 27.07.2010–01.08.2010



Численный океанографический прогноз

Зависимость от атмосферы



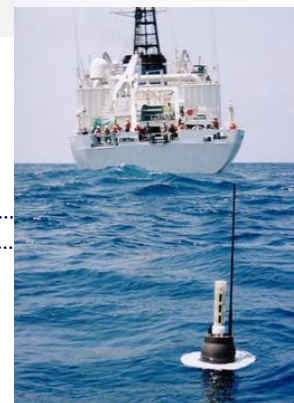
Невозможен без информации о состоянии приводного слоя атмосферы, необходимой для задания атмосферных воздействий на поверхности воды (ветер, радиационные потоки, температура воздуха ...)



Наблюдаемое в последние десятилетия становление оперативной океанографии, базирующейся на численных прогнозах состояния морской среды, стало возможным благодаря развитию морской наблюдательной сети, включая спутниковые дистанционные измерения, и численных моделей океана



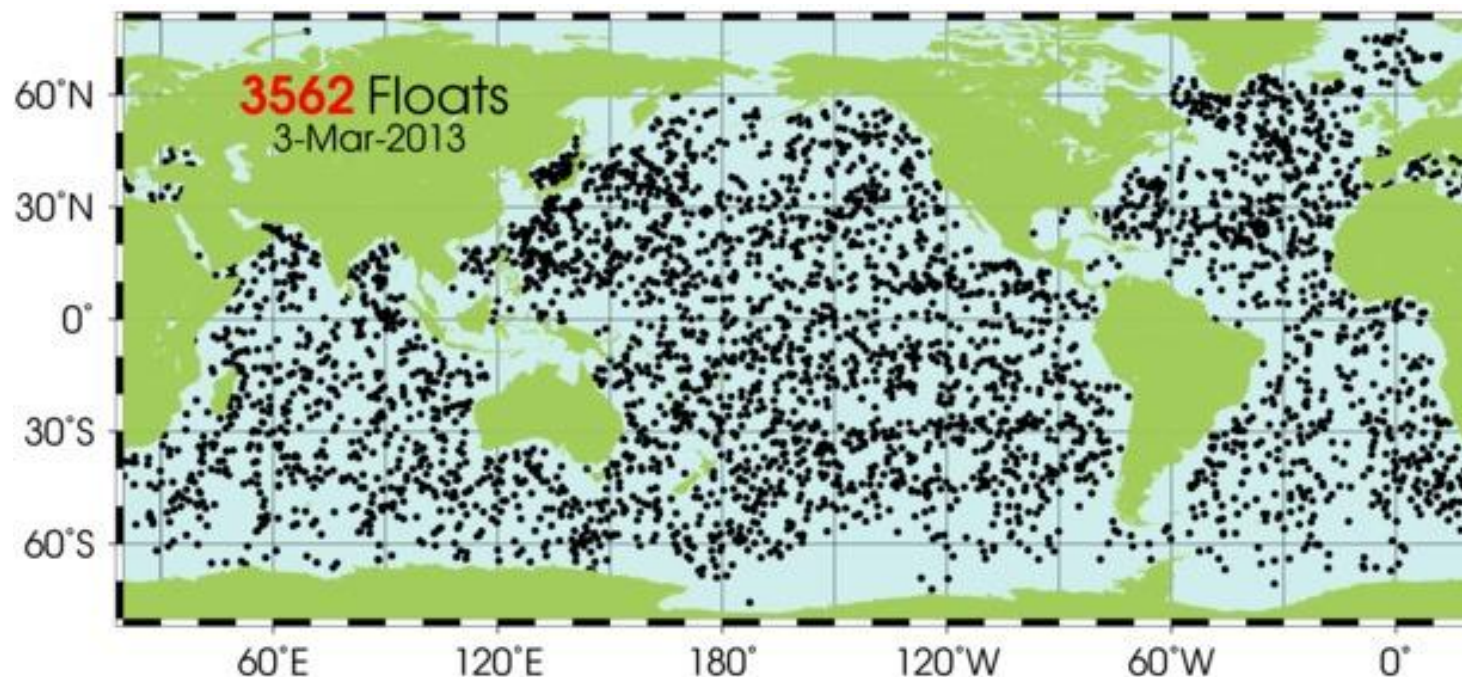
Система ныряющих буев Argo (Array for Real-time Geostrophic Oceanography)



1999 г. – начало размещения буев

Ноябрь 2007 – выход на плановый уровень 3000 устройств

2013 г. – свыше 3500 работающих буев

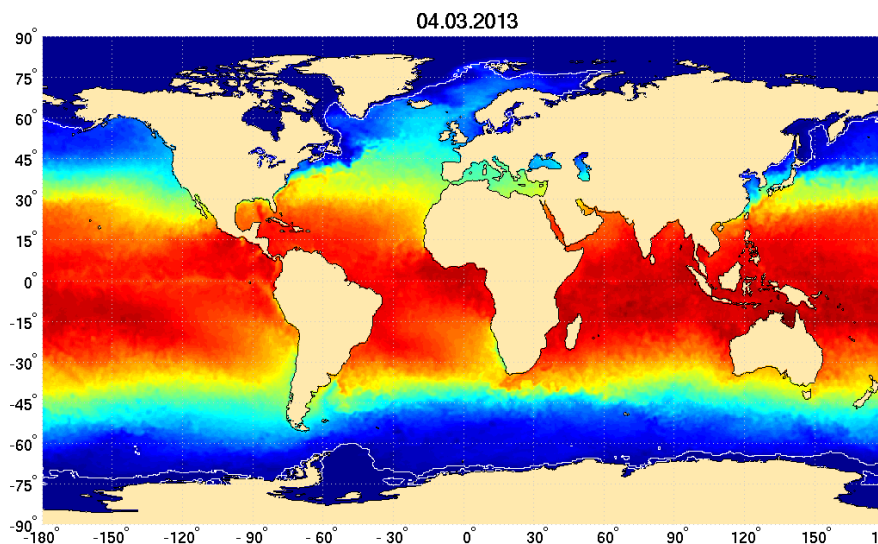


Распределение буев Argo по состоянию на 3 марта 2013 г.

(<http://www.argo.ucsd.edu/>)

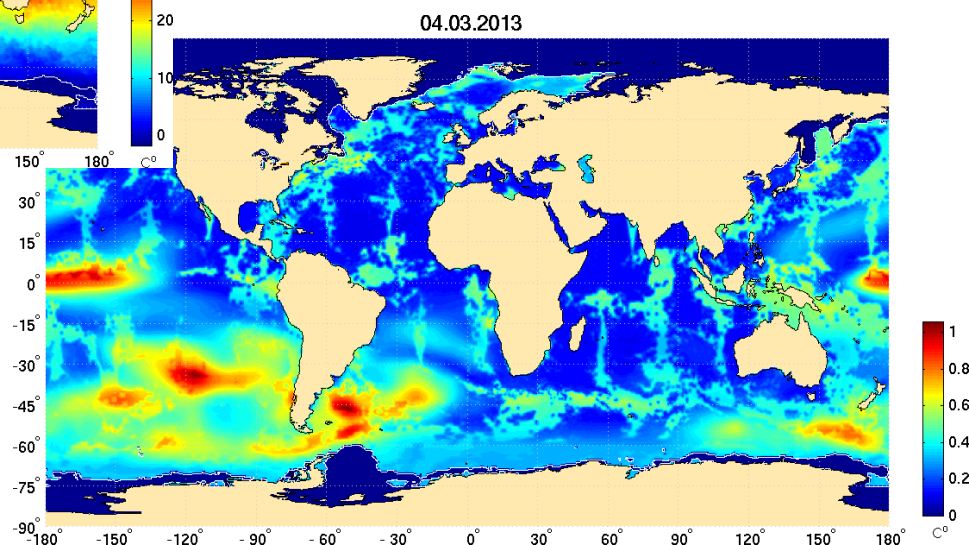


Появление ежесуточного диагноза полей ТПО на основе объединения информации контактных и спутниковых наблюдений



Поле ТПО

Погрешность оценки ТПО



С сайта Гидрометцентра России <http://hmc.hydromet.ru/sea/ocean/sst/daily/daily.html>
Построено по данным NCDC/NOAA, сетка $\frac{1}{4} \times \frac{1}{4}$ град.



Дистанционные измерения ветровых волн с помощью спутниковой альтиметрии с почти глобальным покрытием

Спутники

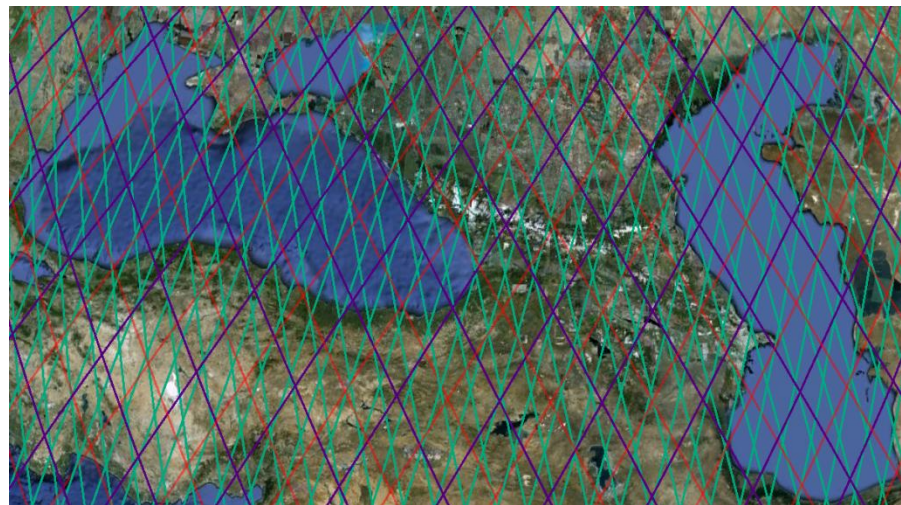
Jason-1
Jason-2
Envisat-1
Cryosat-2

Горизонтальный масштаб зондируемого элемента площади: $\sim 3 - 5$ км

Точность измерений: $\max(0.4 \text{ м}, 0.1 \times \text{SWH}_{\text{measured}})$

Приборы

Poseidon-2(3) altimeter
RA-2 altimeter
SAR/Interferometric Radar Altimeter
Jason-1 Microwave Radiometer
Advanced Microwave Radiometer

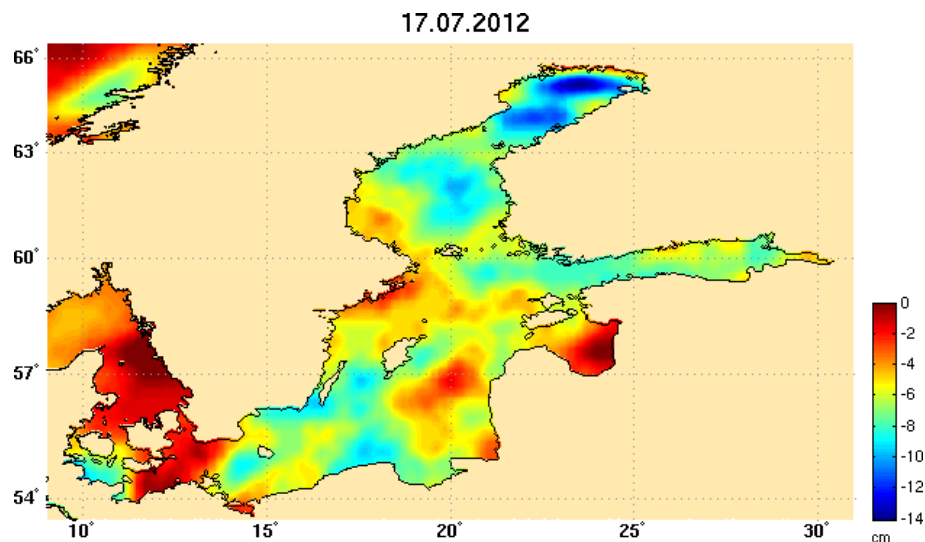


----- Envisat-1, ----- Jason-1, ----- Jason-2



Спутниковая альтиметрия для определения рельефа морской поверхности с почти глобальным покрытием

Аномалии уровня Балтийского моря по состоянию на 17 июля 2012 г.
(по данным сайта ФГБУ "Гидрометцентр России"
http://hmc.hydromet.ru/sea/balt/ssh/ssha_balt.html).



Точность измерения ± 3 см
для аномалий уровня

Аномалии уровня (см) представляют собой отклонения, вычисленные относительно средних значений за 1993–1999 гг. Распределение аномалий отражает динамические процессы в море. Области повышенных значений соответствуют антициклонической циркуляции, а области пониженных – циклонической.

Источник данных: AVISO <http://www.aviso.oceanobs.com> (имеются с 1992 г.)

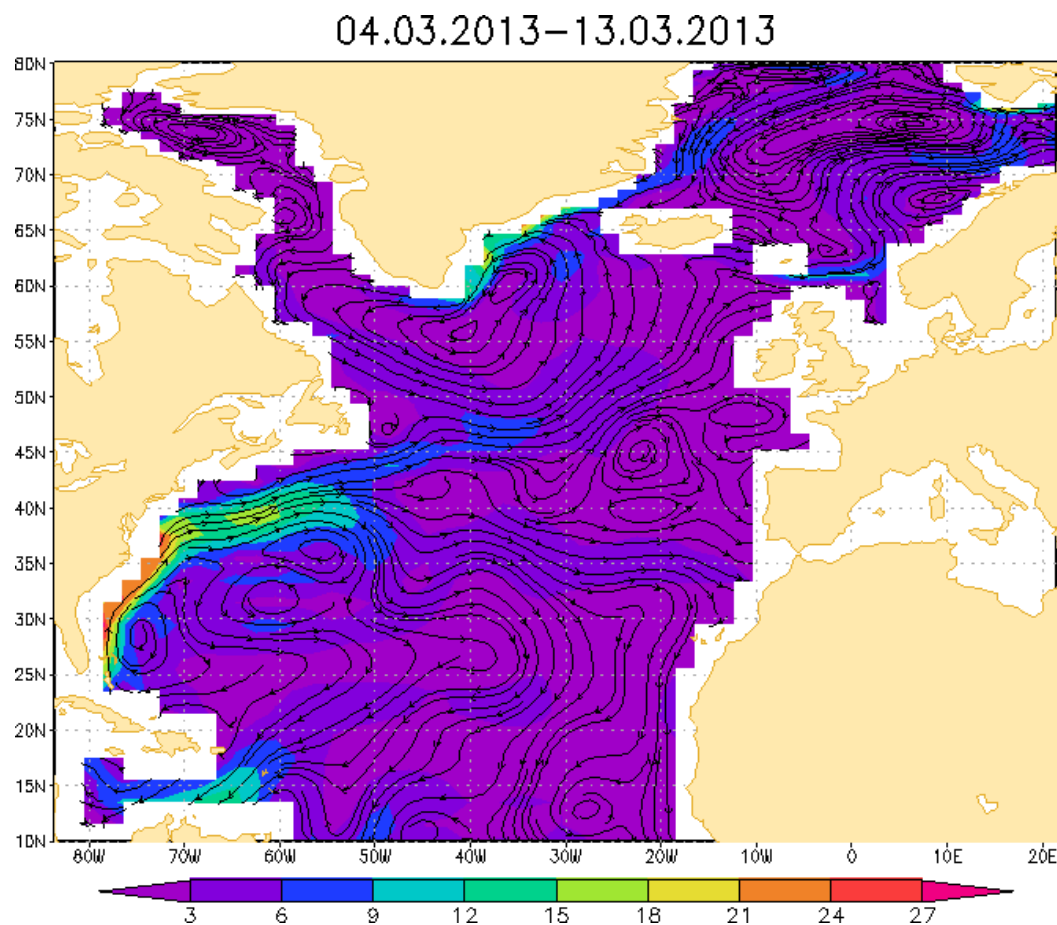


Возможность оценки текущего состояния вод океана на основе системы усвоения океанографических данных

Среднее за 10 суток
(04.03.2013–13.03.2013)
поле скорости течений в
Северной Атлантике на
глубине 50 м по данным
системы усвоения
океанографических данных
ФГБУ "Гидрометцентр
России", представленным
на сайте

<http://hmc.hydromet.ru/sea/ocean/godas/mapz.php?r=na&i=1&j=1>.

Скорость течений (см/сек)
показана цветовыми
градациями. Направление
течений характеризуют
линии тока.





Пример численного океанографического прогноза

Прогноз ветрового волнения в Гидрометцентре России



Прогноз ветрового волнения

Расчет развития со временем характеристик ветрового волнения по спектральной модели **WaveWatch III** v.3.14 с использованием метеорологической прогностической информации

- Метеорологическая прогностическая информация
Среднесрочные метеорологические прогнозы
ПЛАВ (ГМЦ) или GFS (NCEP/NOAA)
- Сведения о ледовом покрове
Интернет источники (MMAB/NCEP; Bremen Univ.)





Прогноз ветрового волнения: выходная продукция

Представлена на сайте: <http://hmc.hydro-met.ru/sea/index.html>

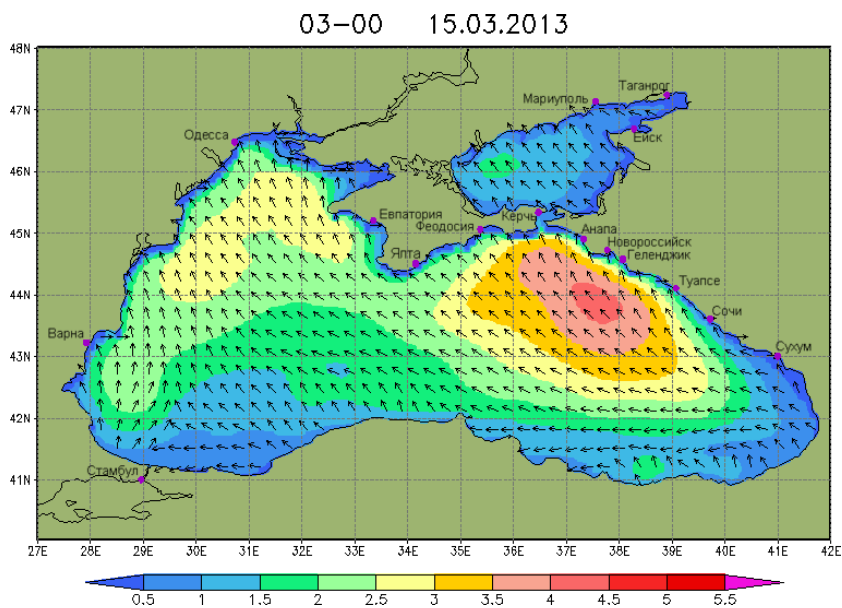
Характеристики ветровых волн в узлах расчетной сетки (сеточные поля), представляющие интерес для пользователей морской информации:

- ✓ **Высота значительных волн (англ. Significant Wave Height, SWH) и среднее направление распространения**
- ✓ **Средняя длина волн**
- ✓ **Средний период волн**
- ✓ **Высота ветровых волн и среднее направление их распространения**
- ✓ **Высота волн зыби и среднее направление их распространения**

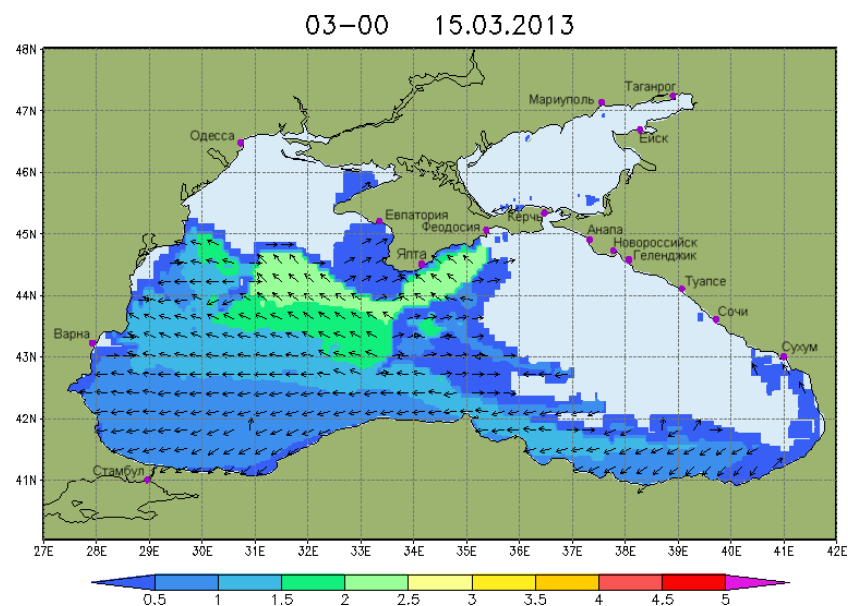


Прогноз ветрового волнения: Пример выходной продукции

Прогноз на 27 час от 00 ВСВ 14.03.2013



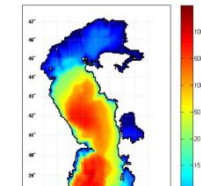
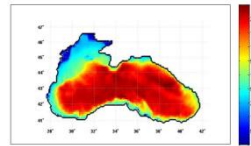
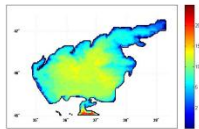
SWH и направление распространения



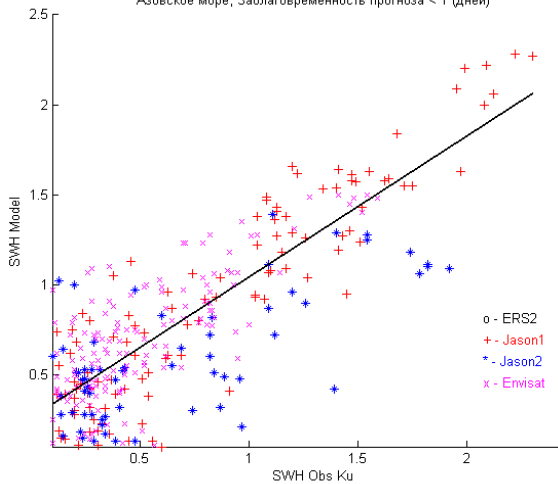
Высота волн зыби и
направление распространения

Прогноз ветрового волнения: сопоставление с наблюдениями

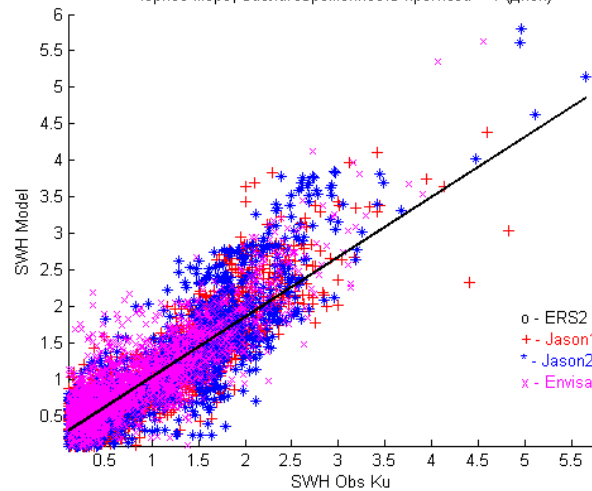
Диаграммы рассеяния
наблюдения – прогнозы SWH на 1-е сутки в период 15.04.2011–30.11.2011



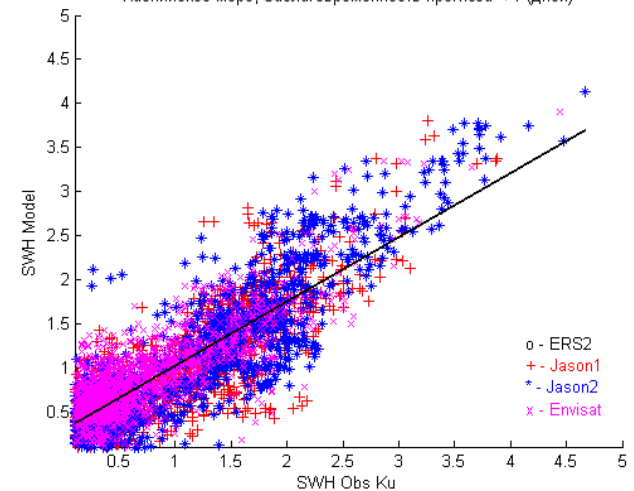
Азовское море, Заблаговременность прогноза < 1 (дней)



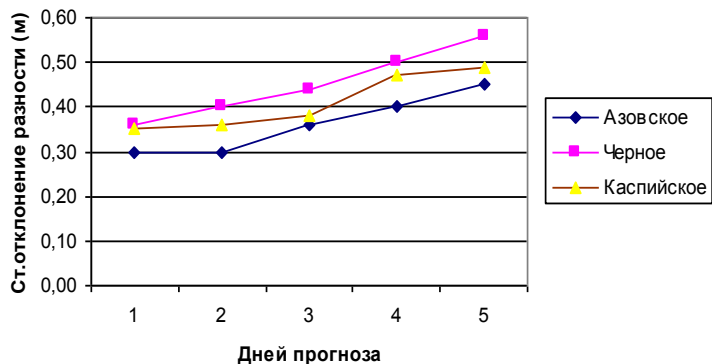
Черное море, Заблаговременность прогноза < 1 (дней)



Каспийское море, Заблаговременность прогноза < 1 (дней)

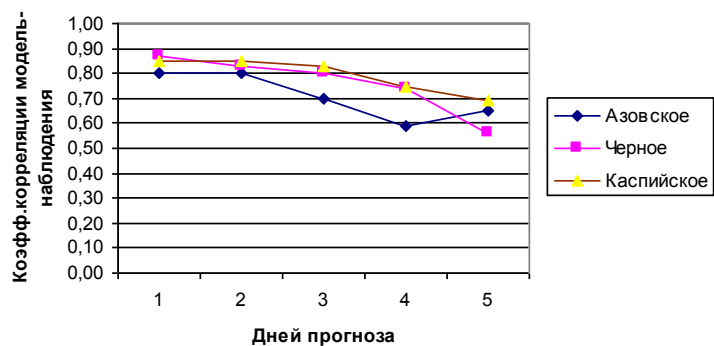


Прогноз ветрового волнения: показатели качества



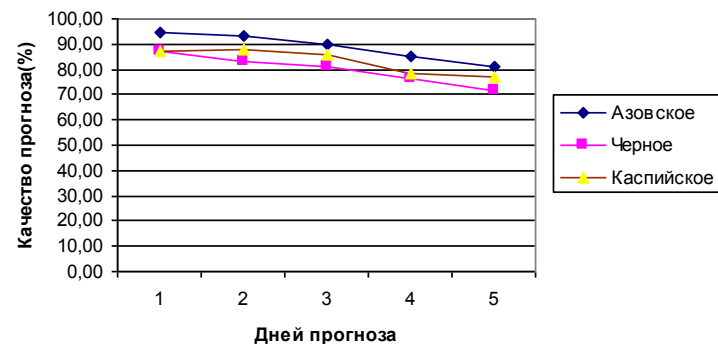
RMSE

Ежедневные прогнозы
за период 15.04.2011–
30.11.2011



Корреляция

Оправдываемость, %





Прогноз ветрового волнения: Зависимость от метеорологического прогноза

Коэффициент корреляции между ошибками прогностических значений SWH и ошибками прогностических значений скорости ветра

Море	Заблаговременность прогноза, сутки				
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Азовское	0.57	0.57	0.69	0.76	0.82
Черное	0.48	0.57	0.61	0.67	0.71
Каспийское	0.47	0.52	0.54	0.63	0.62

Снижение качества прогнозов с увеличением заблаговременности в значительной мере определяется снижением точности прогнозов ветра. Это подтверждается стабильным увеличением корреляции ошибок прогнозов SWH и ветра. Таким образом, можно ожидать повышение оправдываемости прогнозов SWH с улучшением прогнозов скорости ветра



Пути дальнейшего развития прогностических систем

- 1. Расширение наблюдательной сети**
- 2. Совершенствование методов усвоения данных**
- 3. Всемирное улучшение прогностических моделей**
(повышение пространственного разрешения, использование более эффективных вычислительных алгоритмов, улучшение понимания физических механизмов, управляющих эволюцией атмосферы и океана, и на этой основе уточнение параметризаций подсеточных физических процессов)
- 4. Обратные связи с пользователями**



Спасибо за внимание